

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ГОУ ВПО «УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра технологии переработки пластмасс

Ю.И. Литвинец

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ПОЛИМЕРОВ ЭКСТРУЗИЕЙ

Методические указания к практическим занятиям,
курсовому и дипломному проектированию
специальности 240502 «Технология переработки пластических
масс и эластомеров»
по дисциплине «Основы проектирования и оборудование
предприятий по переработке полимеров»

Екатеринбург
2010

Рекомендовано к изданию методической комиссией инженерно-экологического факультета Уральского государственного лесотехнического университета.

Протокол № 1 от 15 октября 2008 г.

Рецензент – доцент, канд. техн. наук В. П. Орлов.

Редактор К.В. Корнева
Оператор К.В. Корнева

Подписано в печать 12.04.10.		Поз. 47
Плоская печать	Формат 60x84 1/16	Тираж 75 экз.
Заказ №	Печ. л. 3,25	Цена 16 руб. 88 коп.

Редакционно-издательский отдел УГЛТУ
Отдел оперативной полиграфии УГЛТУ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Экструзия – метод формования в экструдере изделий или полуфабрикатов неограниченной длины продавливанием расплава полимера через формующую головку, геометрическая форма выходного канала которой определяет профиль получаемого изделия или полуфабриката.

Около половины производимых термопластов перерабатывается этим способом. Экструзией получают гранулы, пленки, листы, трубы, шланги, капилляры, прутки, профильные и выдувные изделия, провода и кабели в пластмассовой изоляции.

Основным оборудованием экструзионного процесса является экструдер, оснащенный формующей головкой. В экструдере полимерный материал расплавляется, пластицируется и затем выдавливается через головку.

Обычно экструдер входит в состав агрегата (линии) для изготовления конкретного изделия (пленки, листов, труб и т. д.).

1.1. ЭКСТРУДЕРЫ

По устройству и принципу работы основного узла, продавливающего расплав в головку, экструдеры подразделяются на *шнековые*, *бесшнековые* (*дисковые*) и *комбинированные*.

Основным оборудованием для переработки полимеров методом экструзии служат шнековые экструдеры, называемые также червячными прессами.

Значительно реже применяются бесшнековые, или дисковые, экструдеры, в которых рабочим органом, продавливающим расплав в головку, является диск особой формы.

Комбинированные экструдеры имеют в качестве рабочего органа устройство, сочетающее шнековую и дисковую части, и называются червячно-дисковыми. Они применяются для обеспечения хорошего смешительного эффекта, особенно при переработке композитов.

Шнековые экструдеры могут быть различных типов: одно- и двухшнековые; одно- и двухступенчатые; универсальные и специализированные; с осциллирующим (вдоль оси) и одновременно вращающимся шнеком; с зоной дегазации и без нее; с вращением шнеков в одну, в противоположные стороны и т. п.

Наиболее простым и часто применяемым является одношнековый экструдер без зоны дегазации.

Внешний вид одношнекового экструдера представлен на рис. 1, принципиальная его схема – на рис. 2.



Рис. 1. Одношнековый экструдер

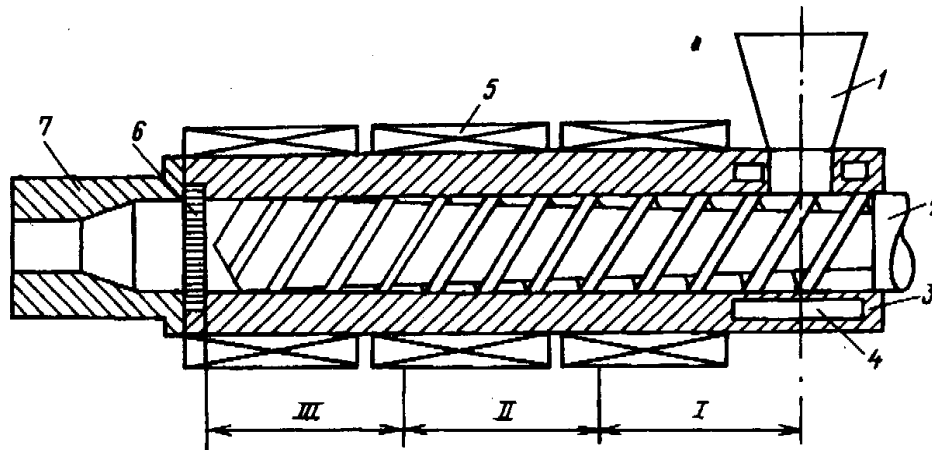


Рис. 2. Схема одношнекового экструдера:

- 1 – бункер; 2 – шнек; 3 – цилиндр;
- 4 – полость для циркуляции охлаждающей воды;
- 5 – нагреватель; 6 – решетка с сетками; 7 – формующая головка;
- I, II, III – технологические зоны (пояснения см. в тексте)

Экструдер работает следующим образом. Полимерный материал из бункера 1 поступает в материальный цилиндр 3, захватывается вращающимся шнеком (червяком) 2 и транспортируется к формующей головке 7. При этом полимер в зоне I (зона питания) размягчается и уплотняется в пробку, в зоне II (зона пластикации) расплавляется, а в зоне III (зона дози-

рования или питания) гомогенизируется и выдавливается в формующую головку через решетку с сетками 6. Для обеспечения требуемого теплового режима и условий транспортирования на материальном цилиндре установлены зонные кольцевые нагреватели 5. Участок цилиндра вблизи загрузочного отверстия охлаждается водой по каналам 4. Конструкция червяка, как правило, предусматривает его внутреннее охлаждение водой.

Подготовка полимерного материала к формованию, пластикация, гомогенизация и подача в головку осуществляется с помощью вращающегося шнека в цилиндре экструдера. В зависимости от природы полимера, технологических режимов переработки применяются шнеки различного профиля. Для переработки термопластов обычно применяют два типа шнеков: с переменной глубиной спирального канала и с переменным шагом.

На рис. 3 показана схема шнека с переменной глубиной спирального канала (с переменной глубиной нарезки), дающая представление о его геометрических параметрах.

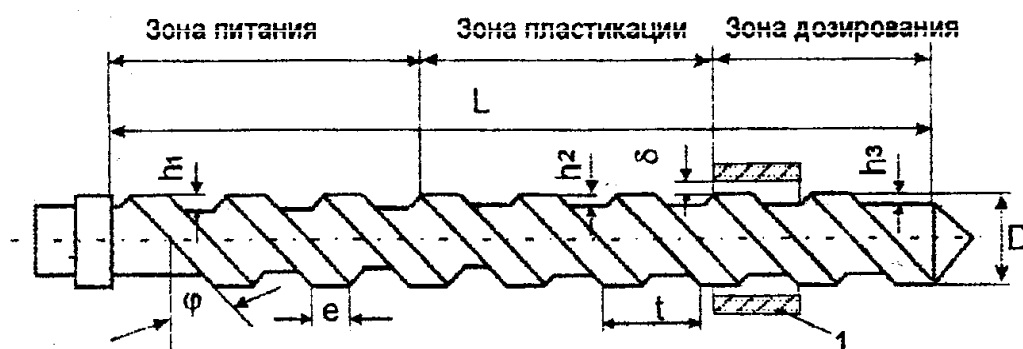


Рис. 3. Шнек экструдера

Основными геометрическими параметрами шнека являются:

- 1) диаметр D ;
- 2) длина L ;
- 3) шаг винтовой нарезки t ;
- 4) глубина канала по зонам (глубина нарезки) h ;
- 5) ширина гребня витка e ;
- 6) величина зазора между гребнем шнека и внутренней стенкой цилиндра δ ;
- 7) угол подъема винтовой линии нарезки шнека φ ;
- 8) зонность;
- 9) число заходов нарезки шнека λ (чаще всего $\lambda = 1$).

Для переработки термопластов обычно применяются цилиндрические шнеки с постоянным шагом и переменной глубиной винтового канала. Они сравнительно просты в изготовлении и обеспечивают высокую производительность. Диаметр шнеков отечественных экструдеров регламентирован

ГОСТом 14773 и составляет размерный ряд: 20; 32; 45; 63; 90; 125; 160; 200; 320; 450; 630 мм. Чем больше диаметр шнека, тем выше производительность экструдера. Длина шнеков L характеризуется ее отношением к диаметру D (L/D). Это соотношение может изменяться в интервале 8...40. Значения D и L/D являются основными характеристиками одношнекового экструдера и указываются в его марке. Например, ЧП 45х20 означает: ЧП – червячный пресс с червяком (шнеком) диаметром $D = 45$ мм и $L/D = 20$ (длина шнека $20D = 900$ мм).

Модели отечественных одношнековых прессов универсального назначения для переработки термопластов изготавливаются с отношением L/D 20, 25 и 30. Для специальных шнековых машин отношение L/D может быть увеличено до 35 или 40. Наибольшее распространение получили машины с отношением L/D , равным 20 и 25, однако в последнее время намечается тенденция к увеличению L/D до 35...40, что в совокупности с увеличением угловой скорости шнека приводит к значительному увеличению производительности шнековых машин.

Преимуществом длинных шнеков является повышенное качество пластикации материала и создание высокого давления истечения через формующий инструмент при небольшой глубине винтового канала. Это особенно важно при формовании изделий с помощью головок, имеющих высокое сопротивление (производство пленок, изоляция проводов и кабелей и др.).

Основные технико-экономические характеристики одношнековых экструдеров отечественного производства и зарубежных фирм приведены в прил. 1.

Выбор некоторых параметров червяков можно осуществить по табл. 1 и 2 [1].

Таблица 1

Зонность шнеков, учитывающая свойства полимерных материалов

Свойства полимеров	Зона питания	Зона пластикации	Зона дозирования
Высокая термостабильность (ПЭНП, ПЭВП, ПП, ПС, СНП, АВС)	0,25L	0,35L	0,4L
Низкая термостабильность, склонность к термомеханической деструкции (ПФА, ПВХ жесткий)	–	0,6L	0,4L
Резкое уменьшение вязкости при плавлении (ПА, ПК, ПЭТФ)	0,3L	0,1L	0,6L

Таблица 2

Конструктивные параметры шнеков, рекомендуемые
для некоторых полимерных материалов и изделий

Полимерный материал	Вид изделия	Средний градиент скорости сдвига γ , с^{-1}	Число витков в зоне дозирования	Коэффициент сжатия (отношение глубины канала в зоне питания и дозирования)
ПЭВП	Трубы	50...110	8...9	3,7...4,35
	Листы	100...230	9	3,7...4,35
ПЭНП	Покрытия	100...240	9	4,0...4,75
	Трубы	100...230	8	3,7...4,35
	Пленки	100...230	9	3,7...4,35
ПП	Любой	50...110	9	3,5...4,35
ПВХ жесткий		55...110	5	2,7...3,1
ПВХ пластифицирован- ный		15...40	7	3,35...4,0
ПА 6.6		90...120	9	4,0...4,35
ПС		50...110	9	4,0...4,35
УПС		100... 200	9	4,0...4,35
ПММА		40...100	9	3,35...3,7

2. РАСЧЕТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЭКСТРУДЕРОВ

2.1. РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИИ ШНЕКА И ЧАСТОТЫ ЕГО ВРАЩЕНИЯ

В качестве исходного параметра для расчета задается диаметр шнека D . Если он не задан, то его можно взять из технической характеристики предварительно выбранной технологической линии для производства изделия или ориентировочно рассчитать по соотношению (в мм).

$$Q = 0,68D^{2,5}, \quad (2.1)$$

где Q – объемная производительность, мм³/с.

Полученное значение диаметра шнека округляют до ближайшего большего числа из стандартного ряда диаметров шнеков для конкретного вида полимерного материала.

После выбора диаметра и отношения L/D приступают к определению остальных параметров.

Шаг нарезки t и глубина витка h существенным образом влияют на производительность шнековой машины. Шаг витка в зоне загрузки в основном зависит от коэффициента трения материала о шнек и стенки материального цилиндра и от вида загружаемого материала (гранулы, порошок). Для идеального шнека оптимальным углом наклона нарезки был бы угол 45° , соответствующий шагу $h = \pi D$.

В действительности значения коэффициента трения материала о шнек находятся в пределах 0,3...0,6. Значение коэффициента трения 0,5 соответствует углу наклона нарезки шнека 19° , т. е. шагу $1,1D$. В большинстве случаев для зоны загрузки рекомендуется принимать шаг от 0,7 до $1,5D$.

Для зоны дозирования оптимальным является угол наклона нарезки 30° , что соответствует шагу нарезки $1,8D$, однако это значение является слишком высоким, так как шнеки с большим шагом и большой глубиной очень чувствительны к изменению давления, температуры и вязкости материала. На практике шаг винтовой нарезки t для машин по переработке пластмасс рекомендуется принимать постоянным по длине шнека.

$$t = (0,8...1,2)D \quad (2.2)$$

Обычно шаг принимается равным диаметру шнека, т. е. $t = D$, что соответствует углу подъема винтового канала $17^\circ 42'$. В этом случае обеспечивается не только достаточно хорошее питание машины материалом, но и существенно упрощается технология изготовления шнека.

Для обеспечения высоких степеней сжатия материала могут применяться шнеки с переменным по длине шагом нарезки.

Рекомендации по выбору глубины винтового канала, в зависимости от свойств перерабатываемого сырья, сводятся в каждом отдельном случае к чувствительности материала к перегреву.

Глубина винтового канала шнеков h для переработки пластических масс принимается равной:

1) в зоне питания (загрузки)

$$h_1 = (0,12 \dots 0,16)D; \quad (2.3)$$

2) в зоне дозирования

$$h_3 = 0,5 \left[D - \sqrt{D^2 - \frac{4h_1}{i}(D - h_1)} \right], \quad (2.4)$$

где степень сжатия материала i принимают по табл. 2;

3) в зоне пластикации (сжатия)

$$h_2 = h_1 - \frac{h_1 - h_3}{L} L_0, \quad (2.5)$$

$$L_0 = L - L_n, \quad (2.6)$$

где L – длина шнека, см;

L_0 – длина шнека до зоны сжатия, см;

L_n – длина напорной части шнека, см,

$$L_n = (0,4 \dots 0,6)L. \quad (2.7)$$

При выборе толщины витка e (ширины гребня) необходимо учитывать, что увеличение толщины витка приводит к повышению расхода мощности, а уменьшение ее – к образованию значительного потока утечки через зазор между внутренней поверхностью материального цилиндра и наружной поверхностью витка шнека. Ширину гребня витка шнека рекомендуется принимать равной

$$e = (0,06 \dots 0,1)D. \quad (2.8)$$

Меньшие значения принимаются для диаметров шнека более 125 мм, большие – менее 125 мм.

Радиальный зазор между внутренней поверхностью материального цилиндра и наружной поверхностью витка шнека рекомендуется принимать

$$\delta = (0,002 \dots 0,005)D. \quad (2.9)$$

При этом меньшие значения принимаются для больших величин диаметров шнеков.

Частота вращения шнека существенно влияет на производительность шнековых машин. Ее рост происходит до определенного значения частоты вращения шнека (критического), выше которого начинается неуставившееся движение материала (частицы материала прекращают двигаться в осевом направлении, а лишь вращаются вместе со шнеком). Это приводит к уменьшению производительности, увеличению потребляемой мощности и повышенному износу рабочих частей машины.

Критическая частота вращения шнека в зоне загрузки шнековой машины может быть определена по следующему соотношению (с^{-1}):

$$n_{\text{сд}} = \frac{42,2}{60\sqrt{D}}, \quad (2.10)$$

где D – диаметр шнека, м.

В зонах сжатия и дозирования допускаемую частоту вращения шнеков значительно уменьшают для соблюдения допускаемой температуры нагрева материалов, невозникновения их термомеханической деструкции (для термопластов) и преждевременной вулканизации (для резиновых смесей).

Рабочая частота вращения шнека равна

$$n_p = (0,2 \dots 0,7) n_{\text{кр}}, \quad (2.11)$$

где нижние значения числовых коэффициентов принимают для малых диаметров шнеков, верхние – для больших значений. На практике частота вращения находится в пределах от $0,08$ до $4,2 \text{ с}^{-1}$.

В последнее время начали применять адиабатические (автотермические) шнековые машины со скоростями вращения до $8,4 \text{ с}^{-1}$.

2.2. РАСЧЕТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОДНОШНЕКОВЫХ ЭКСТРУДЕРОВ

Определяющее влияние на производительность машины оказывает дозирующая зона шнека. Эффективность дозирующей зоны сильно зависит от геометрических параметров самого шнека. Отдача же шнекового экструдера в целом зависит не только от геометрических размеров шнека и числа оборотов, но и в значительной степени от конструкции формирующей головки.

На основе гидродинамического подхода к анализу взаимодействия рабочих органов с перерабатываемым материалом в дозирующей зоне экструдера принято рассматривать три составляющие потока движения расплава:

- 1) поток расплава, движущийся по межвитковому пространству в направлении от зоны загрузки к зоне дозирования вдоль оси шнека; возникает вследствие вращения шнека относительно цилиндра;
- 2) поток расплава, движущийся в противоположном направлении, что вызвано перепадом давления P по длине шнека;
- 3) поток утечки, движущийся в зазоре между наружной поверхностью витков шнека и внутренней поверхностью материального цилиндра в направлении от зоны дозирования.

Подобное разделение на три потока в канале шнека следует считать условным, так как противотока практически не существует, а имеет место некоторое ограничение прямого потока, возникающее в результате сопротивления головки.

Объемная производительность шнековой машины для переработки термопластов, в зависимости от сопротивления головки и конструкции дозирующей зоны, может быть выражена соотношениями:

$$Q = \frac{A K}{K + B + C} n; \quad (2.12)$$

$$Q = \frac{A_1 K}{K + B_1 + C_1} n; \quad (2.13)$$

$$Q = \frac{A_2 K}{K + B_2 + C_2} n, \quad (2.14)$$

где Q – объемная производительность, см³/мин;

K – коэффициент сопротивления головки, см³;

n – частота вращения шнека, мин⁻¹;

A, A_1, A_2 – соответственно постоянные прямого потока для шнеков с постоянными геометрическими размерами, переменной глубиной и шагом нарезки в зоне дозирования, см³;

B, B_1, B_2 – соответственно постоянные обратного потока для шнеков с постоянными геометрическими размерами, переменной глубиной и шагом нарезки в зоне дозирования, см³;

C, C_1, C_2 – соответственно постоянные потока утечек для шнеков с постоянными геометрическими размерами, переменной глубиной и шагом нарезки в зоне дозирования, см³.

Значения постоянных прямого потока A , обратного B и потока утечек C определяются следующим образом.

Для шнека с постоянными геометрическими размерами нарезки:

$$A = \frac{\pi D h (t - \lambda e) \cos_2 \varphi}{2}; \quad (2.15)$$

$$B = \frac{h^3 (t - \lambda e) \sin 2\varphi}{24 L_n}; \quad (2.16)$$

$$C = \frac{\pi^2 D^2 \delta^2 \operatorname{tg} \varphi \cdot \sin \varphi}{10 e L_n}, \quad (2.17)$$

где D – наружный диаметр шнека, см;

t – шаг нарезки шнека, см;

h – глубина нарезки, см;

e – ширина гребня нарезки, см;

λ – число заходов;

δ – величина зазора между гребнем шнека и внутренней стенкой цилиндра, см;

φ – угол подъема винтовой линии нарезки шнека; $\operatorname{tg} \varphi = t/\pi D$;

L_n – длина зоны дозирования, см.

Для шнека с переменной глубиной нарезки:

$$A_1 = \frac{\pi^3(t - \lambda e)\sigma}{a + t^2b}; \quad (2.18)$$

$$B_1 = \frac{\pi t(t - \lambda e)}{12L_h(a + t^2b)}; \quad (2.19)$$

$$C_1 = \frac{\pi D \delta^3 t^2}{10eL_h \sqrt{\pi^2 D^2 + t^2}}, \quad (2.20)$$

где σ , a , b – коэффициенты, характеризующие конструкцию шнека с переменной глубиной нарезки. Они определяются по следующим соотношениям ($1/\text{см}^2$, $1/\text{см}^4$):

$$\sigma = 1 - \frac{6,9D}{2(h_2 - h_3)} \lg \frac{h_2}{h_3} + \frac{D^2}{2h_2h_3}; \quad (2.21)$$

$$a = \frac{\pi^2}{h_2h_3} \left[\frac{D(h_2 + h_3)}{2h_2h_3} - 1 \right], \quad (2.22)$$

$$b = \frac{2,3}{(h_2 - h_3)D^3} \lg \frac{h_2(D + d_3)}{h_3(D + d_1)} + \frac{2h_2h_3 + (h_2 + h_3)D}{2D^2h_2^2h_3^2}, \quad (2.23)$$

где d_1 – диаметр сердечника (вала) шнека под загрузочной воронкой, см:

$$d_1 = D - 2h_1; \quad (2.24)$$

d_3 – диаметр сердечника шнека в зоне дозирования, см:

$$d_3 = D - 2h_3. \quad (2.25)$$

Для шнека с переменным шагом нарезки:

$$A_2 = \frac{\pi^3 D (D - h)^2 h J_1}{4\pi^2 (D - h)^2 J_2 - J_3}; \quad (2.26)$$

$$B_2 = \frac{\pi h^3 (D - h) \Delta t}{3[4\pi^2 (D - h)^2 J_2 - J_3]}; \quad (2.27)$$

$$C_2 = \frac{\pi D^2 \delta^3 \Delta t}{5e(D - h)[\pi(D - h)J_4 + \Delta t J_5]}, \quad (2.28)$$

где J_1 , J_2 , J_3 , J_4 , J_5 – коэффициенты, характеризующие конструкцию шнека с переменным шагом нарезки. Они определяются по следующим соотношениям (см, см^2):

$$J_1 = t_1 - t_3 + 2,3\Delta t \lg \frac{t_1}{t_3}, \quad (2.29)$$

$$J_2 = \frac{2,3}{2e} \left[(2e + \Delta t) \lg i - \Delta t \lg \frac{t_1}{t_3} \right]; \quad (2.30)$$

$$J_3 = (t_1 - t_3)(t_1 + t_3 + 2\Delta t + 6e) + 4,6e(\Delta t + 2e) \lg i, \quad (2.31)$$

$$J_4 = 2,3 \lg \frac{\operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2}}{\operatorname{tg} \frac{\varphi_3}{2}} + 2 \frac{\sin \frac{\varphi_1 + \varphi_3}{2} \sin \frac{\varphi_1 - \varphi_3}{2}}{\cos \varphi_1 \cos \varphi_3}; \quad (2.32)$$

$$J_5 = 2 \frac{\cos \frac{\varphi_1 + \varphi_3}{2} \sin \frac{\varphi_1 - \varphi_3}{2}}{\sin \varphi_1 \sin \varphi_3} - 2,3 \frac{\operatorname{tg} \frac{90 - \varphi_1}{2}}{\operatorname{tg} \frac{90 - \varphi_3}{2}}, \quad (2.33)$$

где Δt – разность между соседними шагами. Если параметры шнека известны из его чертежа, то Δt рассчитывают по формуле:

$$\Delta t = \frac{t_1 - t_3}{m - 1}, \quad (2.34)$$

где t_1 – шаг нарезки шнека у загрузочной воронки, см. Если он неизвестен, можно выбрать из соотношения $t_1 = (0,75 \dots 1,25)D$;

t_3 – шаг нарезки в конце шнека, см. Если он неизвестен из чертежа шнека, можно рассчитать по следующей формуле при заданной степени сжатия i :

$$t_3 = \frac{t_1 + e(i - 1)}{i}, \quad (2.35)$$

$$m = \frac{2L_{\text{н}}}{t_1 + t_3}, \quad (2.36)$$

где m – число шагов в напорной части шнека.

Здесь длина напорной части шнека $L_{\text{н}}$ (длина зоны, в которой материал находится в расплавленном состоянии) рассчитывается:

$$L_{\text{н}} = (0,65 \dots 0,75)L.$$

Δt можно также вычислить по формуле:

$$\Delta t = \frac{t_1^2 - t_3^2}{2L_{\text{н}} - t_1 - t_3}. \quad (2.37)$$

Угол подъема винтовой линии в зоне загрузки φ_1 :

$$\varphi_1 = \operatorname{arctg} \frac{t_1}{2\pi R_{\text{ср}}}. \quad (2.38)$$

Угол подъема винтовой линии в зоне дозирования φ_3 :

$$\varphi_3 = \operatorname{arctg} \frac{t_3}{2\pi R_{\text{cp}}}. \quad (2.39)$$

Средний радиус R_{cp} рассчитывается:

$$R_{\text{cp}} = (D - h)/2,$$

Для шнека с переменным шагом угол подъема винтовой линии φ_i является переменной величиной и может быть найден из формулы:

$$\operatorname{tg} \varphi_i = \frac{t_i}{\pi D}. \quad (2.40)$$

Объемную производительность экструдера Q , см³/мин пересчитывают в массовую часовую производительность по формуле (кг/ч):

$$Q_{\text{ч}} = \frac{60 Q \rho_{\text{p}}}{10^6}, \quad (2.41)$$

где ρ_{p} – плотность расплава полимера при температуре переработки (на выходе из экструдера), кг/м³.

Плотность расплава полимеров при различных температурах приведена в прил. 2.

2.3. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ В ФОРМУЮЩЕЙ ГОЛОВКЕ

Головка экструдера – это съемный технологический инструмент, предназначенный для оформления экструдированного расплава в погонажное изделие, конфигурация поперечного сечения которого определяется геометрией формующего канала (щели, фильеры).

Конструкции формующих головок характеризуются значительным разнообразием.

По направлению потока расплава головки могут быть прямоточными и угловыми. В последних происходит поворот расплава, и изделие выходит из головки под определенным углом к оси входного потока.

По конфигурации формующей щели различают головки плоскощелевые, кольцевые (трубные, рукавные), профильные.

По форме профиля – головки для изделий открытого типа (листы, плоские пленки, стержни, уголки, швеллера и др.), закрытого типа (рукава, трубы, шланги, трубчатые уплотнители), смешанного типа и специальные головки (сложные профили, армированные, комбинированные, гибридные изделия).

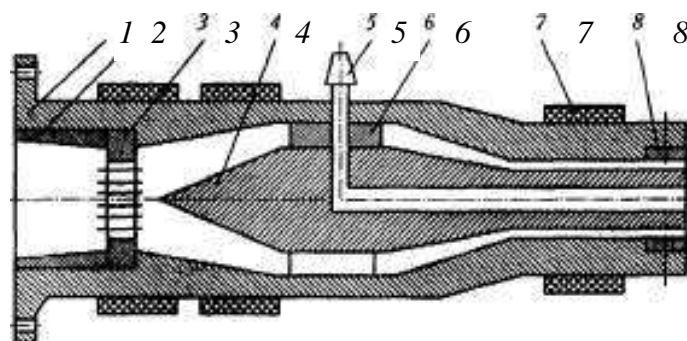


Рис. 4. Схема устройства экструзионной головки
(пояснения в тексте)

По величине давления различают головки низкого (до 4 МПа), среднего (до 10 МПа) и высокого (более 10 МПа) давления.

При всем разнообразии конструкционного оформления в большинстве формующих головок можно выделить наличие общих элементов (рис. 4).

К ним относятся: корпус 1 с элементом присоединения к цилиндру экструдера (это может быть фланцевое, байонетное или резьбовое соединение); адаптер 2; фильтр-решетка 3; кольцевые зонные электронагреватели 7; регулировочное кольцо 5 (губка в плоскощелевых головках). В головках закрытого типа обязательно присутствует дорн 4 с дорнодержателем 6 и нередко система 5 для подачи воздуха внутрь изделия (труба, пленочный рукав, закрытый профиль).

Поверхность рабочих каналов головки, кроме ее формующей зоны, может быть гладкой или с винтовой нарезкой, позволяющей улучшить процесс гомогенизации расплава.

Основной геометрической характеристикой формующей головки является ее общий коэффициент сопротивления K_r , определяемый как сумма коэффициентов сопротивления отдельных простых по геометрии участков $k_1, k_2 \dots k_i$ с помощью уравнения:

$$K_r = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_i}}, \quad (2.42)$$

где $k_1, k_2 \dots k_i$ – частные коэффициенты сопротивления участков канала с простой геометрической формой, определяемые по формулам, приведенным в табл. 5.

При расчете K_r головку условно разбивают на участки, отличающиеся конфигурацией, и для каждого участка определяют частный коэффициент сопротивления. Применительно к прямоточной рукавной головке, изображенной на рис. 4, эта операция будет выглядеть следующим образом (рис. 5).

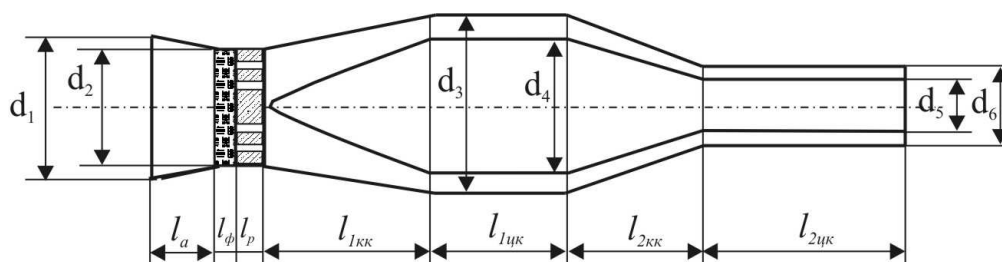


Рис. 5. Схема разбиения на элементарные участки потока расплава в головке, изображенной на рис. 4

Непрерывный поток разделяется на участки:

l_a – участок адаптера: конический круглый канал с большим диаметром на входе;

l_ϕ – участок фильтра;

l_p – участок решетки;

$l_{1кк}$ – конический кольцевой канал с большим диаметром на выходе;

$l_{1цк}$ – цилиндрический кольцевой канал;

$l_{2кк}$ – конический кольцевой канал с большим диаметром на входе;

$l_{2цк}$ – цилиндрический кольцевой формующий канал.

Обычно на пути течения расплава полимера на выходном конце шнека устанавливают фильтровальные элементы, чаще всего в виде пакета сеток из нержавеющей стали. Фильтрующие элементы устанавливаются непосредственно перед входом в головку и предназначены для очистки расплава от различного рода твердых включений, неизбежно попадающих в материал на различных стадиях его производства и транспортировки, а также от не полностью проплавленных в канале червяка частиц материала, которые иногда появляются на выходе из этого канала при работе экструдера с максимальной производительностью на некоторых типах материалов (например, на высокомолекулярном полиэтилене высокой плотности). Обычно применяется набор сеток с различным числом отверстий на единицу площади (табл. 2), причем сетки с меньшим числом отверстий располагают дальше от конца шнека, чтобы избежать выдавливания их вместе с расплавом.

Таблица 2

Характеристика фильтрующих сеток

Параметр	Тип сетки		
	Крупная	Средняя	Мелкая
Диаметр проволоки, мм	0,37	0,16	0,052
Размер ячеек, мм	0,56	0,25	0,075
Число ячеек, шт/см ²	144	576	6400
Поверхность в свету, %	34	37	34

На современных экструдерах устанавливают сито-сменные фильтровальные устройства с общей площадью фильтрующего комплекта 500...2000 см² и числом фильтровальных элементов $n = 5 \dots 20$.

Весь набор сеток поддерживается решеткой, устанавливаемой между цилиндром и головкой, служащей для спрямления потока расплава, выходящего с последнего витка шнека. Она представляет собой стальной диск толщиной примерно 1/5 диаметра цилиндра. В этом диске просверлены отверстия диаметром по 3...6 мм. На рис. 6 показаны решетки нескольких конструкций.

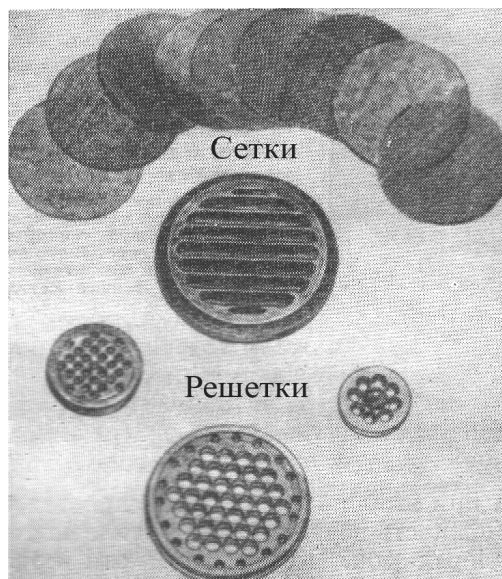


Рис. 2.3. Решетки и сетки различных типов

При производстве листов или пленок через плоскощелевую головку используется решетка с отверстиями в виде узких щелей (в центре рисунка), которые должны быть расположены параллельно плоскости щели головки. При расчете коэффициента сопротивления в головке сопротивления в решетке и фильтре также должны учитываться. Коэффициент сопротивления решетки, см³:

$$K_p = \frac{\pi z d_o^4}{128 \delta_p}, \quad (2.43)$$

$$\gamma = \frac{32 Q}{\pi z d_p^3}, \quad (2.44)$$

где z – число отверстий в решетке;

d_o – диаметр отверстий, см;

δ_p – толщина решетки, см.

Коэффициент сопротивления фильтра, см³:

$$K_{\phi} = \frac{nFd_o^2}{32\delta_{\phi}}; \quad (2.45)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{128 Q}{nFd_o}, \quad (2.46)$$

где n – число фильтровальных элементов;

F – площадь фильтровального элемента, см²;

δ_{ϕ} – толщина фильтрующих элементов, см;

$\dot{\gamma}$ – скорость сдвига расплава, с⁻¹.

Расчетные формулы и схемы для расчета коэффициента сопротивления и скорости сдвига простейших каналов приведены в табл. 3.

Эффективная вязкость расплава может быть найдена по градиенту скорости сдвига $\dot{\gamma}$, см⁻¹, определяемой с (2.47) по (2.49) формулами.

Для шнека с постоянной глубиной нарезки и шагом

$$\dot{\gamma} = \frac{\pi D n}{h}; \quad (2.47)$$

для шнека с переменной глубиной нарезки

$$\dot{\gamma} = \frac{\pi D n}{h_{cp}},$$

$$\text{где } h_{cp} = (h_2 + h_3)/2; \quad (2.48)$$

для шнека с переменным шагом

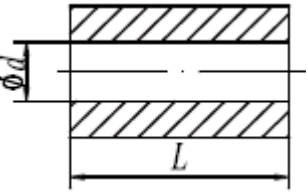
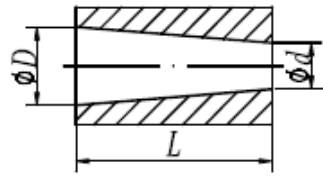
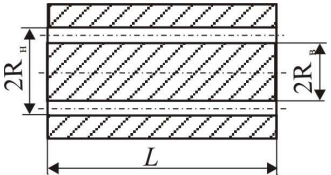
$$\dot{\gamma} = \frac{\pi^2 (D - h) dn}{30h \sqrt{4\pi^2 d^2 + (t_2 + t_3)^2}},$$

$$\text{где } d = D - 2h. \quad (2.49)$$

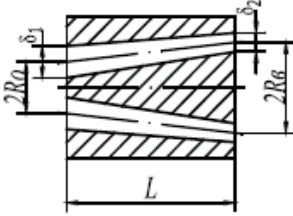
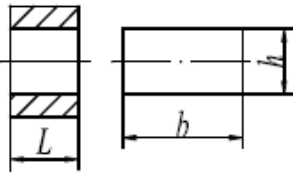
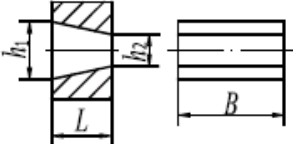
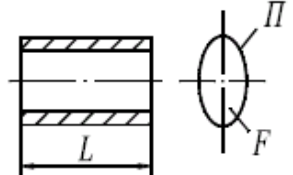
Зная скорость сдвига расплава и температуру переработки, эффективную вязкость можно определить по логарифмической зависимости эффективной вязкости от градиента скорости сдвига: $\lg \eta = f(\lg \dot{\gamma})$.

Таблица 3

Расчетные формулы и схемы для расчета коэффициента сопротивления
и скорости сдвига простейших каналов*

Тип канала	Расчетная схема	Коэффициент сопротивления K , см ³	Скорость сдвига расплава, $\dot{\gamma}$, с ⁻¹	Номер формулы
Цилиндри- ческий круглый		$\frac{\pi d^4}{128L},$ где d – диаметр канала	$\frac{32Q}{\pi d^3}$	(2.50)
Кониче- ский круглый		$\frac{3\pi D^3 d^3}{128L(D^2 + Dd + d^2)},$ где D, d – диаметры конуса на входе и выходе рас- плава	$\frac{256Q}{\pi(D + d)^3}$	(2.51)
Кольцевой цилиндри- ческий		$\frac{\pi}{8L} \left[R_{\text{н}}^4 - R_{\text{в}}^4 - \frac{(R_{\text{н}}^2 - R_{\text{в}}^2)^2}{\ln \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{в}}}} \right]$ где $R_{\text{н}}, R_{\text{в}}$ – наружный и внутренний радиусы	$\frac{6Q}{\pi(R_{\text{н}} + R_{\text{в}})(R_{\text{н}} - R_{\text{в}})^2}$	(2.52)

* L – длина канала; Q – производительность, см³/с; все размеры в см.

Тип канала	Расчетная схема	Коэффициент сопротивления K , см ³	Скорость сдвига расплава, $\dot{\gamma}$, с ⁻¹	Номер формулы
Конический кольцевой		$\frac{\pi(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)}{6Lm},$ <p>где R_1, R_2 – средние радиусы конуса на входе и выходе; m – коэффициент, определяемый по формуле:</p> $m = \frac{2,3(R_1 - R_2)^2}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)^2} \lg \frac{R_1\delta_2}{R_2\delta_1} - \frac{(R_1 - R_2)(\delta_1 - \delta_2)}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)\delta_1\delta_2} - \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{2\delta_1^2\delta_2^2}$	$\frac{22,3Q}{4\pi(R_1 + R_2)(\delta_1 + \delta_2)^2},$ <p>где δ_1, δ_2 – толщина щели на входе и выходе</p>	(2.53)
Прямоугольный щелевой		$\frac{bh^3}{12L},$ <p>где b – ширина канала, h – толщина канала</p>	$\frac{5,58Q}{bh^2}$	(2.54)
Клиновидный щелевой		$\frac{bh_1^2h_2^2}{6L(h_1 + h_2)},$ <p>где h_1, h_2 – толщина щели на входе и выходе</p>	$\frac{11,2Q}{b(h_1 + h_2)^2}$	(2.50)
Произвольное поперечное сечение		$\frac{F^3}{2L\Pi^2},$ <p>где F – площадь поперечного сечения; Π – периметр поперечного сечения</p>	$\frac{2Q}{\Pi F}$	(2.55)

На рис. 7 приведена в графическом виде зависимость $\lg \eta = f(\lg \dot{\gamma})$ для ПЭНП, а также ее математическое выражение.

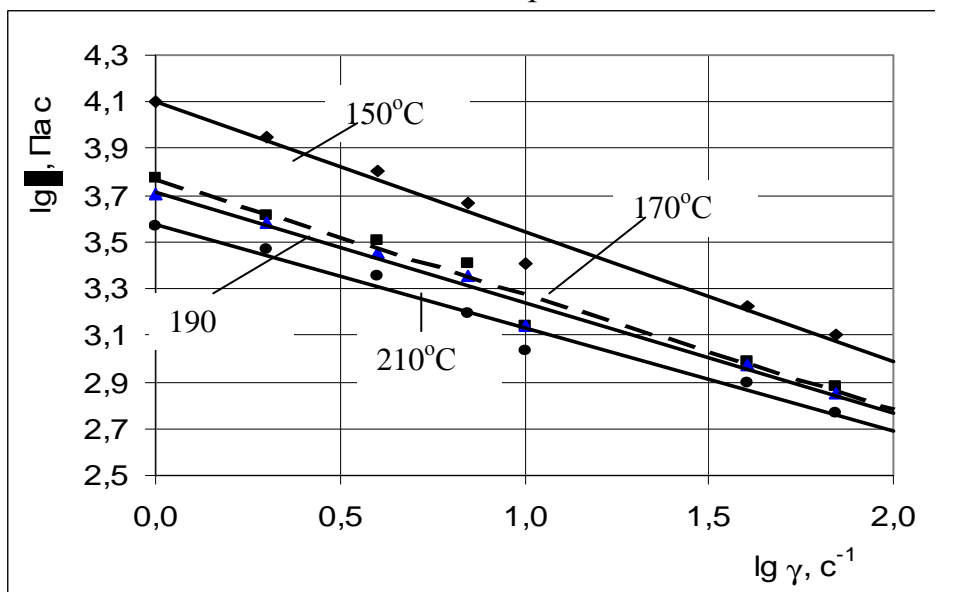


Рис. 7. Зависимость вязкости ПЭНП от градиента скорости сдвига при различных температурах

$$150^{\circ}\text{C}: \lg \eta = -0,558 \lg \dot{\gamma} + 4,102; 170^{\circ}\text{C}: \lg \eta = -0,495 \lg \dot{\gamma} + 3,769;$$

$$190^{\circ}\text{C}: \lg \eta = -0,475 \lg \dot{\gamma} + 3,713; 210^{\circ}\text{C}: \lg \eta = -0,444 \lg \dot{\gamma} + 3,577.$$

Для других полимеров соответствующие уравнения приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значения коэффициентов
в уравнении зависимости эффективной вязкости расплава
от скорости сдвига для различных полимеров $\lg \eta = -A \lg \dot{\gamma} + B$

Полимер	Температура, °C	A	B
ПЭВП	150	0,556	4,028
	170	0,520	3,848
	190	0,503	3,732
	210	0,489	3,638
Полипропилен	190	0,751	4,591
	210	0,742	4,483
	230	0,736	4,415
	250	0,711	4,284
Полиамид	160	0,301	3,619
	180	0,007	3,375
Полистирол	180	0,774	4,697
	200	0,709	4,455
	220	0,684	4,270
	240	0,672	4,167

Температуру расплава полимеров в различных участках экструдера можно найти по табл. 5.

Таблица 5

Режимы переработки полимеров экструзией

Материал	Изделие	Температура, °С						Давление (бар)
		Зона 1	Зона 2	Зона 3	Зона 4	Головка	Фильтр	
АБС	Трубы, листы, профили	175	195	205	205	200	210	150...200
		170	175	180	180	180	190	200...250
ПЭНП (ПЭВД)	Трубы, пустотелые корпуса	125	125	130	130	130	135	100...150
	Пленка, получаемая	125	135	135	145	145	145	100...170
	Плоская пленка	155	165	180	195	195	200	150...250
	Изоляция проводов	160	210	230	240	230	235	250...350
	Мононити	160	200	220	240	230	240	250...350
ПЭВП (ПЭНД)	Трубы, пустотелые корпуса	140	160	165	165	165	170	100...170
	Листы	220	190	170	165	165	170	100...170
	Пленка, получаемая экструзией с раздувом	140	160	170	180	180	185	150...200
	Изоляция проводов	200	210	240	250	240	245	250...400
	Мононити	200	210	240	250	240	250	250...400
Полипропилен	Трубы	180	200	215	225	225	235	150...200
	Плоские пленки	190	220	245	265	265	265	200...300
	Мононити	200	230	250	270	270	270	300...400
ПВХ пластикат (порошок)	Гранулят	140	150	160	160	155	155	50...100
	Оплетенная проволока	210	185	175	155	180	190	150...250
ПВХ пластикат (гранулят)	Шланги, профили	180	170	160	150	160	160	60...120
	Оплетенная проволока	200	189	170	150	180	190	150...250
ПВХ винипласт (порошок)	Гранулят	185	175	165	165	160	160	75...150
	Трубы, профили	190	180	170	165	170	180	100...200

ПВХ вини- пласт (грану- лят)	Трубы, профили, плиты	155	165	175	190	180	185	100...200
Поли- амид	Шланги	275	245	235	225	225	225	150...250
	Оплетенная прово- лока	260	270	280	290	290	300	250...300
	Нити, монопнити	265	275	290	300	300	300	250...350
ПММА	Плиты	160	165	170	170	170	180	50...100
ПФ	Трубы, профили	170	190	205	200	200	200	50...100

Важной технологической характеристикой является максимальное давление расплава (P_m , Па), от которого зависит качество экструдата и производительность машины.

Величину P_m можно подсчитать по формуле (2.56):

$$P_m = \frac{\pi D L_d \eta n}{h_{cp}^2 \operatorname{tg} \varphi}, \quad (2.56)$$

где L_d – длина зоны дозирования, см (см. табл. 1). Остальные обозначения в формуле даны выше.

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ

Пример 1. Рассчитать коэффициент сопротивления формирующей головки, представленной на рис. 8. Диаметр шнека – 90 мм.

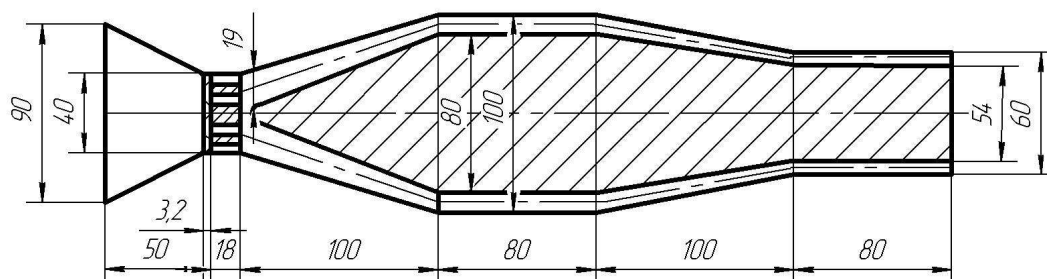


Рис. 8. Компоновка каналов экструзионной трубной головки

В схеме головки на рис. 8 можно выделить следующие элементы:

1) участок адаптера: конический круглый канал с большим диаметром на входе; $D = 9$ см; $d = 4$ см; $L = 5$ см; коэффициент сопротивления адаптера находим по формуле (2.51) (см³):

$$K_1 = \frac{3\pi D^3 d^3}{128L(D^2 + Dd + d^2)} = \frac{3 \cdot 3,14 \cdot 9^3 \cdot 4^3}{128 \cdot 5(9^2 + 9 \cdot 4 + 4^2)} = 5,16;$$

2) участок фильтра: по табл. 2 выбираем среднюю сетку с диаметром проволоки $d = 0,16$ мм и размером ячеек $d_o = 0,25$ мм = 0,025 см; число сеток принимаем $n = 10$; площадь фильтровального элемента $F = \pi r^2 = 3,14 \cdot 2^2 = 12,56$ см²; толщина фильтрующих элементов $\delta_\phi = 2dn = 2 \cdot 0,16 \cdot 10 = 3,2$ мм = 0,32 см; коэффициент сопротивления сетчатого фильтра рассчитывается по формуле (2.45) (см³):

$$K_2 = \frac{nFd_o^2}{32\delta_\phi} = \frac{10 \cdot 12,56 \cdot 0,025^2}{32 \cdot 0,32} = 0,0077;$$

3) участок решетки: толщину решетки принимаем равной $\delta_p = 1,8$ см (1/5 диаметра шнека); число отверстий в решетке принимаем $z = 30$, диаметр отверстий $d_o = 0,3$ см; коэффициент сопротивления решетки рассчитывается по формуле (2.43) (см³):

$$K_3 = \frac{\pi z d_o^4}{128\delta_p} = \frac{3,14 \cdot 30 \cdot 0,3^4}{128 \cdot 1,8} = 0,0033;$$

4) кольцевой конический канал с большим диаметром на выходе: толщина щели на входе $\delta_1 = 1,9$ см, на выходе $\delta_2 = (10 - 8)/2 = 1$ см; средний радиус конуса: на входе $R_1 = 20 - 19/2 = 10,5$ мм = 1,05 см, на выходе $R_2 = 40 + 10/2 = 45$ мм = 4,5 см; $L = 10$ см; коэффициент сопротивления канала рассчитывается по формуле (2.53) (см³):

$$K_4 = \frac{\pi(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)}{6Lm} = \frac{3,14(1,05 \cdot 1 - 4,5 \cdot 1,9)}{6 \cdot 10 \cdot (-1,02)} = 0,384;$$

$$m = \frac{2,3(R_1 - R_2)^2}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)^2} \lg \frac{R_1\delta_2}{R_2\delta_1} - \frac{(R_1 - R_2)(\delta_1 - \delta_2)}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)\delta_1\delta_2} - \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{2\delta_1^2\delta_2^2} =$$

$$= \frac{2,3(1,05 - 4,5)^2}{(1,05 \cdot 1 - 4,5 \cdot 1,9)^2} \lg \frac{1,05 \cdot 1}{4,5 \cdot 1,9} - \frac{(1,05 - 4,5)(1,9 - 1)}{(1,05 \cdot 1 - 4,5 \cdot 1,9)1,9 \cdot 1} - \frac{1,9^2 - 1^2}{2 \cdot 1,9^2 \cdot 1^2} = -1,02;$$

5) кольцевой цилиндрический канал: $R_n = 5$ см, $R_b = 4$ см, $L = 8$ см; коэффициент сопротивления канала рассчитывается по формуле (2.52) (см³):

$$K_5 = \frac{\pi}{8L} \left[R_H^4 - R_B^4 - \frac{(R_H^2 - R_B^2)^2}{\ln \frac{R_H}{R_B}} \right] = \frac{3,14}{8 \cdot 8} \left[5^4 - 4^4 - \frac{(5^2 - 4^2)^2}{\ln \frac{5}{4}} \right] = 0,295;$$

б) кольцевой конический канал с большим диаметром на входе: толщина щели на входе $\delta_1 = 1$ см, на выходе $\delta_2 = (60 - 54)/2 = 3$ мм = 0,3 см; средний радиус конуса: на входе $R_1 = 4,5$ см, на выходе $R_2 = 2,85$ см; $L = 10$ см; коэффициент сопротивления канала находим по формуле (2.53) (см³):

$$K_6 = \frac{\pi(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)}{6Lm} = \frac{3,14(4,5 \cdot 0,3 - 2,85 \cdot 1)}{6 \cdot 10 \cdot (-3,39)} = 0,0231;$$

$$m = \frac{2,3(R_1 - R_2)^2}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)^2} \lg \frac{R_1\delta_2}{R_2\delta_1} - \frac{(R_1 - R_2)(\delta_1 - \delta_2)}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)\delta_1\delta_2} - \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{2\delta_1^2\delta_2^2} =$$

$$= \frac{2,3(4,5 - 2,85)^2}{(4,5 \cdot 0,3 - 2,85 \cdot 1)^2} \lg \frac{4,5 \cdot 0,3}{2,85 \cdot 1} - \frac{(4,5 - 2,85)(1 - 0,3)}{(4,5 \cdot 0,3 - 2,85 \cdot 1)1 \cdot 0,3} - \frac{1^2 - 0,3^2}{2 \cdot 1^2 \cdot 0,3^2} = -3,39;$$

7) формирующий кольцевой цилиндрический канал: $R_H = 3$ см, $R_B = 2,7$ см, $L = 8$ см; коэффициент сопротивления канала рассчитывается по формуле (2.52) (см³):

$$K_7 = \frac{\pi}{8L} \left[R_H^4 - R_B^4 - \frac{(R_H^2 - R_B^2)^2}{\ln \frac{R_H}{R_B}} \right] = \frac{3,14}{8 \cdot 8} \left[3^4 - 2,7^4 - \frac{(3^2 - 2,7^2)^2}{\ln \frac{3}{2,7}} \right] = 0,005;$$

8) общий коэффициент сопротивления головки (см³):

$$K_r = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} + \frac{1}{K_4} + \frac{1}{K_5} + \frac{1}{K_6} + \frac{1}{K_7}} = \frac{1}{\frac{1}{5,16} + \frac{1}{0,0077} + \frac{1}{0,0033} + \frac{1}{0,384} + \frac{1}{0,295} + \frac{1}{0,0231} + \frac{1}{0,005}} = 1,47 \cdot 10^{-3};$$

Пример 2. Рассчитать производительность экструдера, перерабатывающего ПЭНП (труба). Шнек экструдера имеет постоянный шаг и переменную глубину нарезки. Формующая головка – по примеру 1.

Исходные данные: $D = 90$ мм; $\lambda = 1$; $K = 1,47 \cdot 10^{-3}$ см³.

Решение:

1. По формулам (2.2), (2.3), (2.8), (2.9) принимаем:

1) шаг нарезки

$$t = D = 9 \text{ см};$$

2) глубину винтового канала шнека в зоне питания

$$h_1 = 0,13D = 0,13 \cdot 9 = 1,17 \text{ см};$$

3) ширину гребня витка шнека

$$e = 0,09D = 0,9 \cdot 9 = 0,81 \text{ (см);}$$

4) радиальный зазор между внутренней поверхностью материального цилиндра и наружной поверхностью витка шнека:

$$\delta = 0,003D = 0,003 \cdot 9 = 0,027 \text{ (см).}$$

2. Отношение L/D принимаем стандартным:

$$L/D = 25.$$

Длина шнека

$$L = 25D = 25 \cdot 9 = 225 \text{ см.}$$

3. Степень сжатия по табл. 2 принимаем $i = 3,7$.

4. Определяем остальные геометрические параметры шнека:

1) глубину спирального канала в зоне дозирования находим по формуле (2.4) (см):

$$h_3 = 0,5 \left[D - \sqrt{D^2 - \frac{4h_1}{i}(D - h_1)} \right] = 0,5 \left[9 - \sqrt{9^2 - \frac{4 \cdot 1,17}{3,7}(9 - 1,17)} \right] = 0,284;$$

2) глубину спирального канала в зоне пластикации (сжатия) рассчитывается по формуле (2.5) (см):

$$h_2 = h_1 - \frac{h_1 - h_3}{L} L_0 = 1,17 - \frac{1,17 - 0,284}{225} 112,5 = 0,727,$$

где $L_0 = L - L_n = 225 - 112,5 = 112,5 \text{ см (см. (2.6);}$

$L_n = (0,4 \dots 0,6)L = 0,5 \cdot 225 = 112,5 \text{ см (см. (2.7);}$

3) среднюю глубину нарезки в напорной зоне шнека рассчитывается по формуле (2.48) (см):

$$h_{cp} = (h_2 + h_3)/2 = (0,727 + 0,284)/2 = 0,506;$$

4) угол подъема винтовой линии нарезки определяется по формуле (град):

$$\varphi = \arctg(t/\pi D) = \arctg(9/3,14 \cdot 9) = 17,6;$$

5) диаметр сердечника (вала) шнека у загрузочной воронки по формуле (2.24) (см):

$$d_1 = D - 2h_1 = 9 - 2 \cdot 1,17 = 6,66;$$

6) диаметр сердечника (вала) шнека в зоне дозирования рассчитывается по формуле (2.25) (см):

$$d_3 = D - 2h_3 = 9 - 2 \cdot 0,284 = 8,432.$$

5. Вычисляем коэффициенты геометрических параметров шнека по формулам с (2.21) по (2.23) ($1/\text{см}^2$, $1/\text{см}^4$):

$$\sigma = 1 - \frac{6,9D}{2(h_2 - h_3)} \lg \frac{h_2}{h_3} + \frac{D^2}{2h_2h_3} = 1 - \frac{6,9 \cdot 9}{2(0,727 - 0,284)} \lg \frac{0,727}{0,284} + \frac{9^2}{2 \cdot 0,727 \cdot 0,284} = 168,54;$$

$$a = \frac{\pi^2}{h_2h_3} \left[\frac{D(h_2 + h_3)}{2h_2h_3} - 1 \right] = \frac{3,14}{0,727 \cdot 0,284} \left[\frac{9(0,727 + 0,284)}{2 \cdot 0,727 \cdot 0,284} - 1 \right] = 1004,49;$$

$$b = \frac{2,3}{(h_2 - h_3)D^3} \lg \frac{h_2(D + d_3)}{h_3(D + d_1)} + \frac{2h_2h_3 + (h_2 + h_3)D}{2D^2h_2^2h_3^2} =$$

$$= \frac{2,3}{(0,727 - 0,284)} \lg \frac{0,727(9 + 8,432)}{0,284(9 + 6,66)} + \frac{2 \cdot 0,727 \cdot 0,284 + (0,727 + 0,284)9}{2 \cdot 9^2 \cdot 0,727^2 \cdot 0,284^2} = 3,74.$$

6. Определяем постоянные потоков:

1) прямого (2.18) (см³):

$$A_1 = \frac{\pi^3(t - \lambda e)\sigma}{a + t^2b} = \frac{3,14^3(9 - 1 \cdot 0,81)168,54}{1004,49 + 9^2 \cdot 3,74} = 32,68;$$

2) обратного (2.19) (см³):

$$B_1 = \frac{\pi t(t - \lambda e)}{12L_{\text{н}}(a + t^2b)} = \frac{3,14 \cdot 9(9 - 1 \cdot 0,81)}{12 \cdot 112,5(1004,49 + 9^2 \cdot 3,74)} = 1,31 \cdot 10^{-4};$$

3) потока утечек (2.20) (см³):

$$C_1 = \frac{\pi D \delta^3 t^2}{10eL_{\text{н}} \sqrt{\pi^2 D^2 + t^2}} = \frac{3,14 \cdot 9 \cdot 0,027^3 \cdot 9^2}{10 \cdot 0,81 \cdot 112,5 \sqrt{3,14^2 \cdot 9^2 + 9^2}} = 4,79 \cdot 10^{-5}.$$

7. Вычисляем производительность экструдера:

1) объемную (2.13) (см³/мин):

$$Q = \frac{A_1 K}{K + B_1 + C_1} n = \frac{32,68 \cdot 1,47 \cdot 10^{-3}}{1,47 \cdot 10^{-3} + 1,31 \cdot 10^{-4} + 4,79 \cdot 10^{-5}} 56 = 1633;$$

Рабочую частоту вращения шнека находим по формулам (2.10), (2.11) (с⁻¹):

$$n_{\text{кр}} = \frac{42,4}{60\sqrt{D}} = \frac{42,4}{60\sqrt{0,9}} = 2,35,$$

$$n = 0,7n_{\text{кр}} = 0,4 \cdot 2,35 = 0,94 \text{ с}^{-1} = 56 \text{ мин}^{-1};$$

2) массовую (2.41) (кг/ч):

$$Q_{\text{ч}} = \frac{60Q\rho_{\text{р}}}{10^6} = \frac{60 \cdot 1633 \cdot 823}{10^6} = 81,$$

где $\rho_{\text{р}} = 823 \text{ кг/м}^3$ – плотность расплава ПЭНП на выходе из экструдера при температуре расплава 150°C (берем из прил. 2).

Пример 3. Рассчитать максимальное давление расплава в конце шнека для условий задачи примера 2:

1) длина зоны дозирования – по табл. 1 (см):

$$L_d = 0,4L = 0,4 \cdot 225 = 90;$$

$$\operatorname{tg} \varphi = t/\pi D = 9/3,14 \cdot 9 = 0,318;$$

2) градиент скорости сдвига рассчитывается по формуле (2.47) (с⁻¹):

$$\dot{\gamma} = \frac{\pi D n}{h_{\text{ср}}} = \frac{3,14 \cdot 9 \cdot 56}{60 \cdot 0,506} = 52,1,$$

где $h_{\text{ср}} = 0,506$ см (см. выше);

3) эффективная вязкость расплава ПЭНП по логарифмической зависимости $\lg \eta$ от $\lg \dot{\gamma}$ (рис. 7) при температуре расплава в зоне дозирования 150°C:

$$\lg \eta = -0,558 \lg \dot{\gamma} + 4,102,$$

отсюда $\eta = 1380,4$ Па·с;

4) максимальное давление расплава в конце шнека определяем по формуле (2.56) (Па):

$$P_m = \frac{\pi D L_d \eta n}{h_{\text{ср}}^2 \operatorname{tg} \varphi} = \frac{3,14 \cdot 9 \cdot 90 \cdot 1380,4 \cdot 0,94}{0,506^2 \cdot 0,318} = 40,5 \cdot 10^6,$$

$$40,5 \cdot 10^6 \text{ Па} = 40,5 \text{ МПа}.$$

Пример 4. Рассчитать потери давления в формующей головке по примеру 1. Экструдер – по примеру 2.

Температура расплава в головке – 150°C. Объемная производительность равна 1633 см³/мин (27,2 см³/с).

Расчет потерь давления в головке проводится по следующему алгоритму:

1) рассчитывают скорость сдвига $\dot{\gamma}$, с⁻¹, на простых участках $l_1 - l_7$ головки по формулам табл. 3;

2) по логарифмической зависимости $\lg \eta = -A \lg \dot{\gamma} + B$ (табл. 3) при выбранной температуре расплава в головке находят эффективную вязкость η ;

3) по формуле $\Delta P_i = \frac{Q \eta_i}{K_i}$ рассчитывают потери давления на элементарных участках головки;

4) суммируют ΔP .

Результаты расчета примера приведены в табл. 6.

Таблица 6

Участок	Скорость сдвига, $\dot{\gamma}$		Вязкость, η , расчетное значение, Па·с	Потери давления, ΔP , расчетное значение, МПа
	Расчетная формула	Расчетное значение, с ⁻¹		
Адаптер	$\frac{256Q}{\pi(D+d)^3}$	1,0	12 577	0,07
Фильтр	$\dot{\gamma} = \frac{128Q}{nFd_o}$	1109	252,8	0,9
Решетка	$\dot{\gamma} = \frac{32Q}{\pi z d_p^3}$	342	487	4,0
Кольцевой конический канал с большим диаметром на выходе	$\dot{\gamma}_1 = \frac{22,3Q}{4\pi(R_1 + R_2)(\delta_1 + \delta_2)^2}$	1,04	12 405	0,88
Кольцевой цилиндрический канал	$\dot{\gamma}_2 = \frac{6Q}{\pi(R_H + R_B)(R_H - R_B)^2}$	5,8	4752	0,44
Кольцевой конический канал с большим диаметром на входе	$\dot{\gamma}_1 = \frac{22,3Q}{4\pi(R_1 + R_2)(\delta_1 + \delta_2)^2}$	3,89	5926	6,97
Формующий кольцевой цилиндрический канал	$\dot{\gamma}_2 = \frac{6Q}{\pi(R_H + R_B)(R_H - R_B)^2}$	101,4	960,9	5,19

Потери давления в головке:

$$\Delta P = 0,07 + 0,9 + 4,0 + 0,88 + 0,44 + 6,97 + 5,19 = 18,55 \text{ МПа.}$$

Потери давления укладываются в допустимый интервал:

$$15 \text{ МПа} < \Delta P < 25 \text{ МПа.}$$

3. ВЫБОР ОСНОВНОГО И ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

3.1. Выбор и расчет количества основного оборудования

Основным оборудованием для производства пленки, труб, листов профилей, трубок и шлангов являются линии на базе шнековых экструдеров. Модель линии выбирают в зависимости от перерабатываемого сырья, размеров изделий и производительности. Ассортимент экструзионных линий отечественных и зарубежных производителей обширен. Подробную информацию о предлагаемых линиях можно получить на сайтах производителей и поставщиков. Технические характеристики экструзионных линий наиболее известных производителей приведены в приложениях.

Количество технологических линий по производству пленки, листов, труб и т. д. определяют по расчетной производительности линий и проектной мощности производства, если известна конкретная номенклатура выпускаемой продукции.

Расчетную производительность линий ($G'_{\text{л}}$, кг/ч) определяют по формулам:

1) для рукавной пленки

$$G'_{\text{л}} = 60bm_1v \text{ или } G'_{\text{л}} = 120b\delta\rho v; \quad (3.1)$$

2) для листов и плоских пленок

$$G'_{\text{л}} = 60bm_1v \text{ или } G'_{\text{л}} = 60b\delta\rho v; \quad (3.2)$$

3) для труб

$$G'_{\text{л}} = 60m_{\text{шт}}v \text{ или } G'_{\text{л}} = 188,4\delta(D_{\text{в}} + \delta)\rho v; \quad (3.3)$$

4) для трубок и шлангов

$$G'_{\text{л}} = 60m_{\text{шт}}v \text{ или } G'_{\text{л}} = 180,4\delta(D_{\text{н}} - \delta)\rho v; \quad (3.4)$$

5) для профилей

$$G'_{\text{л}} = 60m_{\text{шт}}v \text{ или } G'_{\text{л}} = 60F\rho v, \quad (3.5)$$

где b – ширина изделия, м;

m_1 – масса одного квадратного метра пленки или листа, кг/м²;

$m_{\text{шт}}$ – масса одного погонного метра трубы, трубки, шланга, профиля, кг/м; δ – толщина изделия, м;

$D_{\text{н}}, D_{\text{в}}$ – наружный и внутренний диаметр изделия, м;

F – площадь поперечного сечения профиля, м²;

ρ – плотность материала, кг/м³;

v – скорость отвода изделия, м/мин.

Количество технологических линий рассчитывают для каждого конкретного вида изделия (продукции) по формулам:

$$m' = \frac{G_{\text{ч}}}{G'_{\text{л}}} \quad \text{или} \quad m' = \frac{G_{\text{ч}}}{G_{\text{л}}}, \quad (3.6)$$

где $G_{\text{ч}}$ – часовая мощность производства, кг/ч;

$G'_{\text{л}}$ – расчетная производительность линии, кг/ч;

$G_{\text{л}}$ – проектная производительность линии (по прил. 3, 4).

Полученный результат округляют до ближайшего большего числа.

Количество технологических линий можно рассчитать также по затратам машино-часов на выпуск продукции следующим образом.

1. Рассчитать производительность линии (или взять проектную из прил. 2–4) $G'_{\text{л}}$, кг/ч.

2. Рассчитать затраты машино-часов на выполнение годовой программы ($\Pi_{\text{г}}$, кг/год) по формуле:

$$T_{\text{зат}} = \frac{\Pi_{\text{г}}}{G'_{\text{л}}}, \text{ ч.}$$

3. Рассчитать действительный годовой фонд времени работы экструзионной установки $t_{\text{д}}$.

4. Расчетное количество оборудования будет равно (округлить):

$$m' = \frac{T_{\text{зат}}}{t_{\text{д}}}. \quad (3.7)$$

3.2. ВЫБОР И РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

К вспомогательному оборудованию относятся сушилки для предварительной сушки сырья (если она предусмотрена технологией переработки сырья), машины для переработки возвратных отходов (измельчители, грануляторы, смесители), транспортные средства для подачи сырья в цеховые емкости и к рабочим местам, для вывоза продукции. Технические характеристики вспомогательного оборудования приведены в [1], там же даны рекомендации по расчету его количества, применимые и к процессам экструзии полимеров.

4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

4.1. РАСЧЕТ РАСХОДА МОЩНОСТИ В ОДНОШНЕКОВОМ ЭКСТРУДЕРЕ

Знание потребляемой экструдером мощности необходимо для расчета энергетических затрат на производство изделий. При установившемся режиме экструзии величина потребляемой мощности является показателем стабильности процесса. Обычно контроль ведут по мощности, потребляемой приводом.

Мощность (Вт), потребляемая экструдером (N), расходуется на передвижение массы материала вдоль спирального канала к головке и далее (N_1), а также на срез материала (расплава) в зазоре между гребнем шнека и внутренней стенкой цилиндра (N_2):

$$N = N_1 + N_2. \quad (4.1)$$

Для шнека с переменной глубиной нарезки:

$$N_1 = 9,8 \cdot 10^{-7} \left[\frac{\pi^3 (t - e) L J \eta}{t} n^2 + A_1 \Delta P n \right], \quad (4.2)$$

где A_1 – постоянная прямого потока, см^3 ;

n – частота вращения шнека, с^{-1} ;

J – коэффициент, см^2 .

$$J = \frac{\pi^2 D^2 - 4t}{\pi^2} + \frac{(D + d_3)^3 - (D + d_2)^3}{3(d_3 - d_2)} + \frac{2,3\pi^2 D^5 \ln \frac{h_2}{h_3}}{(t^2 + \pi^2 + D^2)(h_2 - h_3)}, \quad (4.3)$$

где ΔP – перепад давления в головке, Па.

Величина перепада давления в головке складывается из величин давления на тех участках, что и при расчетах коэффициента сопротивления головки K . Расчет ΔP показан выше.

Диаметр вала шнека в начале напорной зоны d_2 , см:

$$d_2 = D - 2h_2.$$

Мощность N_2 рассчитывается следующим образом:

$$N_2 = 9,8 \cdot 10^{-7} \frac{\pi^3 D^3 e L \eta}{\delta t} n^2, \quad (4.4)$$

где L – длина шнека, см;

t – шаг нарезки, см;

δ – величина зазора между стенкой цилиндра и гребнем шнека, см.

В формулах расчета мощности фигурирует вязкость расплава η , которую находят по скорости сдвига следующим образом.

Скорость сдвига (с^{-1}) спиральном канале шнека (для N_1):

$$\dot{\gamma}_{\text{ск}} = \frac{\pi^2 (D - h_{\text{cp}})(D - 2h_{\text{cp}})n}{h_{\text{cp}} \sqrt{\pi^2 (D - 2h_{\text{cp}})^2 + t^2}}, \quad (4.5)$$

где $h_{\text{cp}} = (h_2 + h_3)/2$.

Скорость сдвига в зазоре между гребнем шнека и стенкой цилиндра (для N_2):

$$\dot{\gamma}_{\delta} = \frac{\pi^2 D^2 n}{\delta \sqrt{\pi^2 D^2 + t^2}}. \quad (4.6)$$

Для шнека с переменным шагом нарезки величина N_1 рассчитывается:

$$N_1 = 9,8 \cdot 10^{-7} \left[\frac{\pi^3 (d+h)^3 d^2 \eta}{h} (G - eR)n^2 + A_2 \Delta P n \right], \quad (4.7)$$

где G – коэффициент, см^{-1} :

$$G = \frac{2,3}{2\Delta t} \lg \frac{\cos^2 \varphi_3}{\cos^2 \varphi_2} + \frac{\pi(\varphi_2 + \varphi_3)}{360(d+h)}. \quad (4.8)$$

Угол подъема спиральной линии в начале напорной зоны φ_2 рассчитывается:

$$\varphi_2 = \arctg \frac{t_2}{\pi(D-h)}. \quad (4.9)$$

Шаг нарезки в начале напорной зоны t_2 , см:

$$t_2 = \frac{t_1 + e(i-e)}{i}. \quad (4.10)$$

Угол подъема спиральной линии в конце зоны дозирования φ_3 рассчитывается:

$$\varphi_3 = \arctg \frac{t_3}{\pi(D-h)}. \quad (4.11)$$

Коэффициент R , см^{-2} рассчитывается:

$$R = \frac{2,3}{\pi^2 (d+h)} \lg \frac{t_2^2 \cos^2 \varphi_2}{t_3^2 \cos^2 \varphi_3} + \frac{\pi(\varphi_2 - \varphi_3)}{180(d+h)\Delta t}. \quad (4.12)$$

Для определения вязкости расплава в канале шнека необходимо знать скорость сдвига (c^{-1}):

$$\dot{\gamma} = \frac{\pi^2 (D-h) dn}{30h \sqrt{4\pi^2 d^2 + (t_2 + t_3)^2}}. \quad (4.13)$$

Мощность (Вт), потребляемая шнеком с переменным шагом на срез расплава в зазоре (N_2):

$$N_2 = 4,9 \cdot 10^{-7} \left[\frac{\pi^3 D^2 (d+h) e [2(t_2 - t_3) + 2,3 \Delta t (\lg t_2 - \lg t_3) \eta n^2]}{\delta \Delta t} \right]. \quad (4.14)$$

Для определения вязкости расплава в зазоре между гребнем шнека и стенкой цилиндра:

$$\dot{\gamma}_6 = \frac{\pi^2 D^2 n}{\delta \sqrt{4\pi^2 D^2 + (t_2 - t_3)^2}}. \quad (4.15)$$

Мощность двигателя $N_{дв}$ привода экструдера должна быть выше на величину КПД = 0,4...0,6, чтобы компенсировать неучтенные потери: на преодоление сил трения, на механические потери в приводе экструдера и др., т. е.:

$$N_{дв} = \frac{N}{0,4...0,6}. \quad (4.16)$$

4.2. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ЭКСТРУДЕРА

В основе переработки полимерных материалов в изделия лежат сложные тепловые процессы. Правильное представление о тепловом балансе процесса переработки, т. е. о равенстве подводимой и отводимой теплоты, позволяет установить наиболее оптимальные режимы переработки, дает возможность понять влияние технологических параметров на производительность оборудования и качество готовой продукции, получить данные для экономических расчетов.

Для проведения теплового расчета необходимо знание теплофизических свойств полимеров.

К ним относятся:

- 1) коэффициент температуропроводности a , m^2/c ;
- 2) коэффициент теплопроводности λ , $кДж/м \cdot ч \cdot К$;
- 3) теплоемкость C , $кДж/кг \cdot К$;
- 4) плотность расплава полимера ρ , $кг/м^3$.

Эти свойства в зависимости от температуры для некоторых полимеров приведены в прил. 2.

Тепловой баланс экструдера определяется уравнением:

$$E_{\text{н}} + E_{\text{ш}} = E_{\text{м}} + E_{\text{о}} + E_{\text{п}}, \quad (4.17)$$

где $E_{\text{н}}$ – теплота, поступающая от внешних обогревателей, кВт;

$E_{\text{ш}}$ – теплота, выделяющаяся при работе шнека (так называемый диссипативный нагрев – внутренняя теплота трения), кВт;

$E_{\text{м}}$ – теплота, которая уходит с нагретым материалом, кВт;

$E_{\text{о}}$ – теплота, уносимая системой охлаждения (водой, воздухом и др.), кВт;

$E_{\text{п}}$ – потери тепла в окружающую среду, через кожух экструдера, кВт.

Из уравнения теплового баланса можно рассчитать количество теплоты, которую необходимо подвести к экструдеру через систему обогрева получаем:

$$E_{\text{н}} = E_{\text{м}} + E_{\text{о}} + E_{\text{п}} - E_{\text{ш}}.$$

Составляющие уравнения баланса определяются следующим образом:

$$E_{\text{м}} = G_{\text{м}} \cdot c_{\text{м}} (t_{\text{к}} - t_{\text{н}}), \quad (4.18)$$

где $G_{\text{м}}$ – количество перерабатываемого материала, кг/с;

$c_{\text{м}}$ – удельная теплоемкость полимера, кДж/(кг·К);

$t_{\text{к}}, t_{\text{н}}$ – конечная и начальная температура полимера, К.

$$G_{\text{м}} = \frac{Q}{3600}, \quad (4.19)$$

где Q – массовая производительность экструдера, кг/ч.

$$E_{\text{о}} = G_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}} (t_{\text{в2}} - t_{\text{в1}}), \quad (4.20)$$

где $c_{\text{в}}$ – удельная теплоемкость воды, кДж/(кг·К);

$t_{\text{в2}}, t_{\text{в1}}$ – конечная и начальная температуры воды, К.

Количество воды $G_{\text{в}}$, поступающей на охлаждение шнека, кг/с:

$$G_{\text{в}} = \rho F v,$$

где ρ – плотность воды, кг/м³;

F – площадь поперечного сечения, м²;

v – скорость течения воды, м/с.

$$F = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (4.21)$$

где d – диаметр трубки в теле шнека, м.

$$E_{\text{п}} = F_k \alpha (t_{\text{п}} - t_{\text{с}}), \quad (4.22)$$

$$F_k = \pi d_k L_k,$$

$$\alpha = (9,74 + 0,07 \Delta t) 10^{-3},$$

$$\Delta t = t_n - t_c,$$

$$L_k = L,$$

где F_k – площадь наружной поверхности корпуса экструдера;
 α – коэффициент теплопередачи, кВт/(м²·К);
 t_n – температура наружной поверхности изолированного корпуса, °С;
 t_c – температура окружающей среды, °С;
 d_k – диаметр корпуса с изоляцией, м;
 L_k – длина корпуса, м.

$$\dot{I}_{\text{ш}} = \left(\frac{\pi^3 D^3 n_1 L}{h} + \frac{QP}{\cos^2 \varphi} + \frac{\pi^2 D^2 n^2 \eta_2 e L}{\delta \operatorname{tg} \varphi} \right) 9,8 \cdot 10^{-10}, \quad (4.23)$$

где D – диаметр шнека, см;
 n – частота вращения шнека, об/с;
 P – давление в цилиндре, Па;
 η_1 – вязкость расплава полимера в спиральном канале шнека, Па·С;
 η_2 – вязкость расплава полимера в зазоре между гребнем шнека и стенкой цилиндра, Па·С;
 φ – угол подъема винтовой нарезки шнека, град;
 e – ширина гребня витка, см;
 δ – величина зазора между гребнем шнека и цилиндром, см.
 Длина напорной зоны шнека L_n , см:

$$L_n = (0,4 \dots 0,6) L,$$

где L – длина шнека, см;
 h_n – глубина нарезки канала в напорной части шнека, см.

$$Q_o = \frac{1000 \cdot Q}{3600 \cdot \rho_p}, \quad (4.24)$$

где Q_o – объемная производительность экструдера, см³/с;
 Q – массовая производительность экструдера, кг/ч;
 ρ_p – плотность расплава полимера, г/см³.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Технические характеристики одношнековых экструдеров
производства ОАО «Кузполимермаш»

Технические характеристики	Марка экструдера							
	ЧП 32х25х 6441	ЧП 45х25х 6483	ЧП 63х25х 7244	ЧП 63х30х 6673	ЧП 90х30х 6914	ЧП 90х25х 7193	ЧП 125х2 0х 7002	ЧП 125х27 х 7211
Диаметр шнека, мм	32	45	63	63	90	90	125	125
Производитель- ность, кг/ч:								
ПВД	60	140	120	275	300	–	360	250
ПНД	35	95	–	200	–	–	–	–
ПВХ	–	–	–	–	–	200	–	–
Сэвилен	–	–	80	–	–	–	–	–
Частота вращения шнека, об/мин	30...300	35...350	12,5...125	17,4...174	10...100	10...100	8...80	0,5...50
Установленная мощность, кВт	14,56	41,9	62	96	142	137	142	142
Габаритные размеры, мм:								
длина	1500	3000	2550	2865	4130	3680	4130	4660
ширина	2120	2880	1205	2400	3700	3700	3700	3700
высота	1600	1800	860	2200	1800	1800	1800	1800
Масса, кг	905	1830	1630	2590	3600	4300	4400	4400

**Теплофизические свойства полимеров
при различных температурах**

Принятые условные обозначения:

ρ – плотность, кг/м³;

λ – коэффициент теплопроводности, кДж/м·ч·К;

C – теплоемкость, кДж/кг·К;

a – коэффициент температуропроводности, м²/ч.

**Полиэтилен высокой плотности
(ПЭВП)**

$T, ^\circ\text{C}$	$a \cdot 10^2$	λ	C	ρ
50	9,061	1,760	2,082	932,7
60	8,366	5,874	2,166	929,2
70	7,110	1,534	2,334	924,2
80	6,041	1,416	2,556	917,5
90	4,882	1,278	2,879	909,5
100	3,272	1,027	3,478	901,7
110	2,056	0,901	4,932	888,2
120	1,537	0,788	5,895	868,5
130	1,325	0,675	6,046	842,0
140	3,100	0,603	2,376	819,7
150	3,445	0,624	2,233	811,0
160	3,348	0,608	2,250	800,6
180	3,280	0,599	2,292	797,0
200	3, 028	0,549	2,346	788,7
280	2,880	0,511	2,275	779,3
840	2,891	0,503	2,263	769,0
260	2,920	0,499	2,250	759,0
280	2,956	0,494	2,233	749,0
300	2,981	0,486	2,208	738,0
320	2,988	0,482	2,191	735,5

**Полиэтилен низкой плотности
(ПЭНП)**

$T, ^\circ\text{C}$	$\alpha \cdot 10^2$	λ	C	ρ
40	—	—	2,489	912,6
50	—	—	2,707	908,6
60	7,114	1,877	2,920	903,4
70	6,016	1,714	3,180	895,6
80	4,619	1,441	3,520	886,8
90	3,179	1,228	4,416	874,8
100	2,448	0,989	4,676	864,4
110	2,081	0,834	4,697	853,4
120	2,804	0,716	3,034	842,2
130	3,294	0,675	2,460	832,4
140	3,254	0,670	2,489	827,6
160	3,139	0,649	2,527	818,4
180	3,064	0,637	2,568	809,2
200	3,218	0,616	2,392	800,0
220	3,24	0,591	2,305	791,4
240	3,175	0,582	2,346	782,0
260	3,118	0,570	2,363	773,6
280	3,06	0,561	2,401	763,8

**Полистирол ударопрочный
(ПСУП)**

$T, ^\circ\text{C}$	$\alpha \cdot 10^2$	λ	C	ρ
30	5,42	1,383	2,430	1047
40	5,58	1,467	2,514	1043
50	5,56	1,508	2,598	1040
60	5,62	1,517	2,849	1038
70	4,70	1,534	3,143	1036
80	4,35	1,546	3,436	1034
90	4,00	1,559	3,771	1032
100	3,68	1,575	4,148	1030
110	2,62	1,467	5,447	1028
120	2,66	1,425	5,238	1024
130	2,76	1,299	4,609	1020
140	3,27	1,257	3,771	1018
150	4,85	1,236	2,514	1015
160	4,88	1,282	2,598	1006
170	5,10	1,341	2,640	997
180	5,43	1,467	2,724	987
190	5,88	1,613	2,807	976
200	6,12	1,705	2,891	965
210	6,00	1,726	3,017	953
220	5,90	1,739	3,143	940
230	5,70	1,747	3,310	927
240	5,48	1,751	3,478	914
250	5,28	1,756	3,687	900

АБС

$T, ^\circ\text{C}$	$a \cdot 10^2$	λ	C	ρ
30	4,830	0,691	1,383	1035
40	4,782	0,696	1,412	1030
50	4,778	0,704	1,437	1028
60	4,738	0,712	1,467	1025
70	4,686	0,716	1,496	1022
80	4,672	0,725	1,521	1020
90	4,619	0,729	1,550	1018
100	3,993	0,742	1,844	1021
110	3,994	0,767	1,873	1025
120	3,990	0,784	1,906	1030
130	4,105	0,817	1,936	1028
140	3,964	0,800	1,969	1025
150	3,727	0,758	1,999	1018
160	3,693	0,754	2,028	1007
170	3,656	0,754	2,057	1003
180	3,643	0,754	2,091	990
190	3,608	0,754	2,129	982
200	3,581	0,754	2,577	976
210	3,548	0,754	2,191	970
220	3,519	0,754	2,221	965
230	3,491	0,754	2,250	960
240	3,471	0,754	2,275	955
250	3,444	0,754	2,305	950

Полипропилен

$T, ^\circ\text{C}$	$\alpha \cdot 10^2$	λ	C	ρ
50	7,963	1,328	1,886	884,7
60	6,656	1,131	1,927	882,0
70	5,378	0,951	2,011	879,3
80	4,428	0,813	2,095	876,0
90	3,722	0,708	2,179	872,7
100	3,013	0,603	2,305	869,3
110	2,516	0,557	2,556	866,3
120	2,434	0,557	2,640	867,3
130	2,354	0,557	2,765	855,4
140	2,210	0,566	3,017	847,7
150	2,164	0,620	3,436	833,5
160	1,033	0,423	5,028	815,2
170	0,799	0,369	5,824	792,7
180	1,933	0,369	2,430	785,1
200	1,876	0,360	2,472	776,5
220	1,908	0,356	2,430	768,0
240	1,951	0,348	2,346	758,6
260	2,005	0,339	2,263	748,4
280	2,092	0,331	2,137	740,7
300	2,189	0,323	2,011	732,3
320	2,282	0,318	1,927	724

Поликарбонат

$T, ^\circ\text{C}$	$\alpha \cdot 10^2$	λ	C	ρ
30	6,976	0,708	0,796	1275
40	6,445	0,670	0,817	1273
50	6,004	0,675	0,830	1270
60	5,629	0,587	0,838	1266
70	4,990	0,545	0,880	1240
80	4,499	0,499	0,905	1230
90	4,024	0,453	0,922	1220
100	3,694	0,423	0,943	1215
110	3,378	0,394	0,964	1210
120	3,170	0,377	0,985	1208
130	3,092	0,398	1,068	1203
140	3,122	0,423	1,131	1198
150	3,324	0,453	1,144	1190
160	3,635	0,499	1,156	1186
170	3,935	0,545	1,173	1180
180	4,119	0,574	1,186	1175
190	4,303	0,603	1,198	1170
200	4,410	0,624	1,215	1165
210	4,560	0,649	1,228	1160
220	4,567	0,654	1,240	1152
230	4,578	0,662	1,257	1146
240	4,636	0,670	1,267	1140
250	4,667	0,679	1,278	1136

Полиамид

$T, ^\circ\text{C}$	$a \cdot 10^2$	λ	C	ρ
30	3,560	0,754	1,844	1148
40	3,360	0,725	1,886	1144
50	3,350	0,704	1,844	1140
55	4,150	0,691	1,467	1136
60	4,770	0,679	1,257	1132
70	3,926	0,704	1,592	1126
80	3,198	0,733	2,053	1128
90	3,230	0,763	2,137	1114
100	3,277	0,784	2,158	1108
110	3,330	0,809	2,200	1103
120	3,140	0,838	2,430	1097
130	2,950	0,851	2,640	1091
140	2,690	0,863	2,954	1086
150	2,250	0,867	3,562	1080
160	1,930	0,872	4,190	1075
165	2,670	0,876	3,059	1069
170	2,820	0,859	2,912	1063
180	2,750	0,838	2,891	1058
190	2,690	0,830	2,912	1052
200	2,640	0,821	2,933	1046
210	2,670	0,817	2,954	1040
220	2,640	0,813	2,975	1034
230	2,625	0,809	2,996	1028
240	2,595	0,800	3,017	1022
250	2,538	0,784	3,038	1016

ПВХ непластифицированный

$T, ^\circ\text{C}$	$a \cdot 10^2$	λ	C	ρ
30	–	–	0,796	–
40	–	–	0,838	1121
50	3,064	0,302	0,880	–
60	–	–	0,943	1117,5
70	3,172	0,318	0,901	–
80	–	–	0,838	1109
90	2,682	0,323	1,089	–
100	–	–	1,215	1092,5
110	2,354	0,331	1,299	–
120	–	–	1,383	1068,5
130	2,225	0,339	1,446	–
140	–	–	1,467	1044
150	2,264	0,348	1,487	–
160	–	–	1,425	1021
170	2,714	0,360	1,257	–
180	–	–	1,068	968,5
190	5,569	0,360	0,670	
200	–	–	0,126	961
210	17,9	0,360	–	–

ПВХ пластифицированный

$T, ^\circ\text{C}$	$a \cdot 10^2$	λ	C	ρ
30	–	–	1,351	–
40	–	–	1,387	1121
50	2,106	0,331	1,404	–
60	–	–	1,435	1117,5
70	2,063	0,339	1,477	–
80	–	–	1,504	1109
90	2,077	0,344	1,498	–
100	–	–	1,508	1092,5
110	2,153	0,352	1,508	–
120	–	–	1,534	1068,5
130	2,192	0,358	1,546	–
140	–	–	1,540	1044
150	2,455	0,377	1,487	–
160	–	–	1,408	1021
170	2,516	0,373	1,420	–
180	–	–	1,383	968,5
190	3,146	0,356	1,173	–
200	–	–	1,022	961
210	4,700	0,390	0,863	–

Линии для производства труб ОАО «Кузполимермаш»

Линия для производства труб ЛТ-32

Линия предназначена для производства труб из гранулированных термопластов внутренним диаметром от 3 до 10 мм, применяемых при прокладке различных коммуникаций в строительной, электротехнической и других отраслях, в коммунальном, сельском хозяйстве, быту (для электроизоляции, воды, газа, воздуха, агрессивных жидкостей и т. д.).

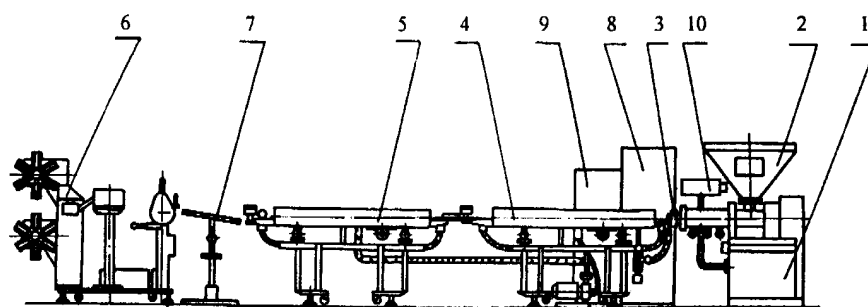


Рис. 9. Линия для производства труб ЛТ-32

- | | |
|----------------------------------|----------------------------|
| 1 – экструдер ЧП 32х25; | 7 – лоток; |
| 2 – бункер; | 8 – шкаф управления; |
| 3 – головка трубная ГТ 2-0,5-3; | 9 – система контроля и |
| 4, 5 – ванна охлаждения водяная; | регулирования температуры; |
| 6 – машина тянуще-намоточная; | 10 – пульт управления |

Технические характеристики	ЛТ-32-0,5/3-2	ЛТ-32-4/10*
Максимальная производительность, кг/ч (не менее)	14...28	15...36
Номенклатура выпускаемых труб: внутренний диаметр, мм толщина стенки, мм длина трубы в бухте, м (не более)	0,5...3,0 0,3...1,0 70	3,8...10 0,6...2,0 50
Скорость отвода трубы, кинематически обеспечивается механизмами, м/мин	0,033...1,666	0,033...0,333
Установленная мощность, кВт (не более), в том числе: электродвигателей электронагревателей	20,30 15,05 5,25	19,74 14,47 5,17
Потребляемое напряжение, В	380/220	380/220
Частота, Гц	50	50
Объемный расход воды, м ³ /ч (не более)	0,6	0,6
Объемный расход сжатого воздуха при 20°С, м ³ /ч	0,5	0,5
Габаритные размеры, мм: длина ширина высота	9000 1530 2200	9920 855 1815

* Для производства труб из ПВХ.

Линия для производства труб ЛТ-45-10/25

Линия предназначена для производства труб из гранулированных термопластов наружным диаметром от 10 до 25 мм, применяемых при прокладке различных коммуникаций в строительной, электротехнической и других отраслях, в коммунальном, сельском хозяйстве, быту (для электроизоляции, воды, газа, воздуха, агрессивных жидкостей и т. д.).

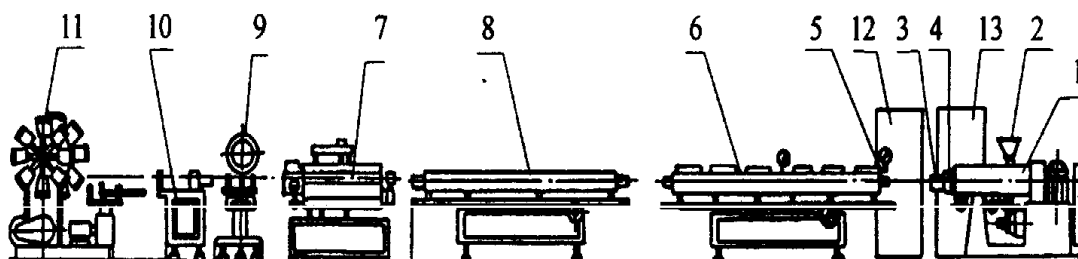


Рис. 10. Линия для производства труб ЛТ-45-10/25

- | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 1 – экструдер ЧП 45х25; | 8 – ванна охлаждения водяная; |
| 2 – бункер; | 9 – устройство для маркировки труб и шлангов; |
| 3 – головка трубяная ГТ 10...25; | 10 – машина для резки труб; |
| 4 – фильтр шибберный ФШ-45; | 11 – машина намоточная; |
| 5 – калибр; | 12 – шкаф управления; |
| 6 – ванна охлаждения вакуум-водяная; | 13 – система контроля и регулирования температуры |
| 7 – машина тянущая двухтраковая; | |

Технические характеристики	ЛТ-45-10/25
Максимальная производительность, кг/ч	80
Номенклатура выпускаемых труб:	
наружный диаметр, мм	10...25
толщина стенки, мм	1,0...4,2
длина трубы в бухте, м	150...850
Скорость отвода трубы, кинематически обеспечивается механизмами, м/мин (м/с)	3...30 (0,05...0,5)
Общая установленная мощность, кВт (не более), в том числе:	53,75
электродвигателей	45,63
электронагревателей	8,12
Электроснабжение – сеть трехфазного тока:	
напряжение, В	380/220
частота, Гц	50
Объемный расход воды, м ³ /ч, не более	1,5
Объемный расход сжатого воздуха при 20°С, м ³ /ч	0,5
Габаритные размеры, мм:	
длина	19490
ширина	1680
высота	2000

Линия для производства труб ЛТ-63-25/63

Линия предназначена для производства труб из гранулированных термопластов наружным диаметром от 25 до 63 мм, применяемых при прокладке различных коммуникаций в строительной, электротехнической и других отраслях, в коммунальном, сельском хозяйстве, быту (для электроизоляции, воды, газа, воздуха, агрессивных жидкостей и т. д.).

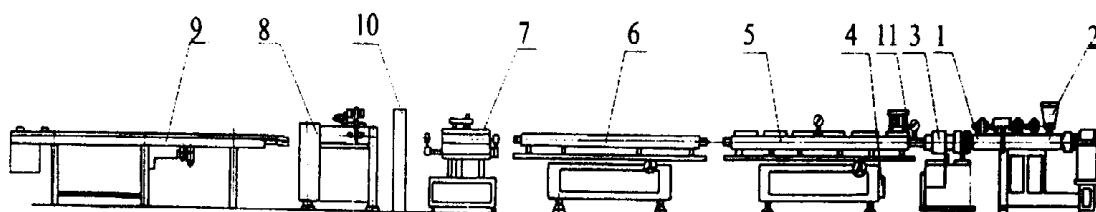


Рис. 11. Линия для производства труб ЛТ-63-25/63

- | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 – экструдер ЧП 63х30; | 7 – машина тянущая двухтраковая; |
| 2 – бункер; | 8 – машина для резки труб; |
| 3 – головка трубная ГТ 25...63; | 9 – оборудование приемное; |
| 4 – пульт управления; | 10 – устройство для маркировки труб; |
| 5 – ванна охлаждения вакуум-водяная; | 11 – калибр |
| 6 – ванна охлаждения водяная; | |

Технические характеристики	ЛТ-63-25/63
Производительность, кг/ч:	
из ПЭНД	90...170
из ПЭВД	80...170
Номенклатура выпускаемых труб:	
наружный диаметр, мм	25...63
длина отрезков, м (не более)	6
Общая установленная мощность, кВт,	115,6
в том числе:	
электродвигателей	87,75
электронагревателей	11,0
Электроснабжение – сеть трехфазного тока:	
напряжение, В	380/220
частота, Гц	50
Объемный расход воды, м ³ /ч (не более)	1,5
Объемный расход сжатого воздуха при 20°С, м ³ /ч	0,5
Габаритные размеры, мм:	
длина	26100
ширина	2400
высота	2006

Линия для производства труб ЛТ-90-75/110

Линия предназначена для производства труб из гранулированных термопластов наружным диаметром от 75 до 160 мм, применяемых в отраслях водогазоэнергоснабжения, для крупнопанельного домостроения, строительства промышленных предприятий (для изготовления сантехнических изделий, канализационных сетей, туннельной прокладки кабеля и проводов).

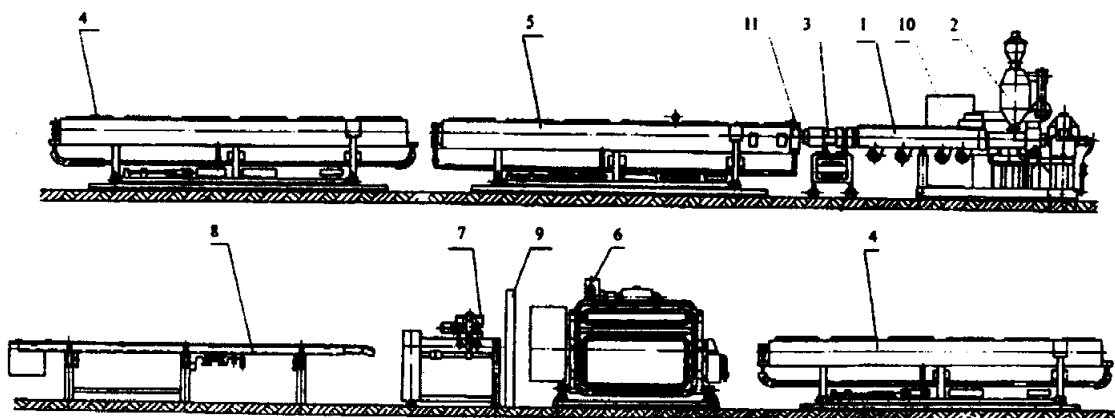


Рис. 12. Линия для производства труб ЛТ-90-75/110

- | | |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 – экструдер ЧП 90х30; | 7 – машина для резки труб; |
| 2 – сушилка СГ-300; | 8 – оборудование приемное; |
| 3 – головка трубная; | 9 – устройство для маркировки труб; |
| 4 – ванна охлаждения водяная; | 10 – пульт управления; |
| 5 – ванна охлаждения вакуум-водяная; | 11 – калибр |
| 6 – машина тянущая двухтраковая; | |

Технические характеристики	ЛТ-90-75/110
Производительность в зависимости от типоразмера, кг/ч	200
Номенклатура выпускаемых труб: наружный диаметр, мм длина отрезков, м, не (более)	75...160 6
Скорость протягивания изделий, кинематически обеспечивается механизмами, м/мин	13
Общая установленная мощность, кВт (не более) в том числе: электродвигателей электронагревателей	189,59 149,59 40
Электроснабжение – сеть трехфазного тока: напряжение, В частота, Гц	380/220 50
Объемный расход воды, м ³ /ч (не более)	7,0
Объемный расход сжатого воздуха при 20°C, м ³ /ч	0,5
Габаритные размеры, мм: длина ширина высота	39 400 3700 2900

Линии для производства рукавной пленки ОАО «Кузполимермаш»

Предназначены для изготовления термоусадочных, а также однослойных рукавных пленок из гранулированного полиэтилена высокого и низкого давления.

Линия ЛРП-63-1000М используется для производства двухслойной полиэтиленовой пленки и пленки полиэтиленовой наполненной для упаковки молока, молочной продукции и т. п.

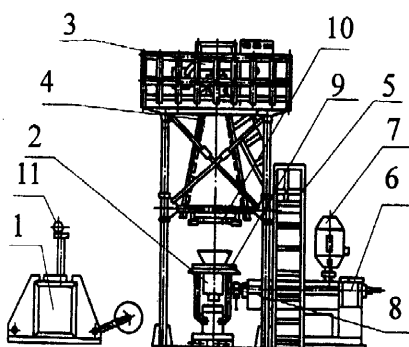


Рис. 13. ЛРП-63-1000, ЛРП-63-1500

- | | |
|------------------------------|--------------------------------------|
| 1 – станок намоточный; | 7 – бункер; |
| 2 – головка пленочная; | 8 – фильтр шибберный; |
| 3 – устройство тянущее; | 9 – устройство наружного охлаждения; |
| 4 – устройство складывающее; | 10 – ограничители рукава; |
| 5 – эстакада; | 11 – ролик отклоняющий; |
| 6 – экструдер; | |

Технические характеристики	ЛДПР-500	ЛРП-63-1000	ЛРП-63-1000М	ЛРП-63-1500М
Ширина пленки в сложенном виде, мм	50...500	600...1000	До 1000	До 1500
Производительность, кг/ч	До 30	До 110	До 110	До 110
Скорость приема пленки, м/мин	3...30	3...30	3...30	3...30
Диаметр наматываемых рулонов, мм	До 350	До 500	До 600	До 400
Количество одновременно наматываемых рулонов, шт.	1	2	2	2
Толщина пленки, мм	0,02...0,15	0,04...0,2	0,09	0,04...0,15
Расход воды, м ³ /ч	0,2	1,5	3,0	0,5
Расход сжатого воздуха, м ³ /ч	0,2	0,2	0,2	0,2
Установленная мощность, кВт	21,63	71,22	135,4	71,22
Габаритные размеры, мм:				
длина	2600	7360	7360	7360
ширина	2300	3300	5000	3300
высота	3850	5700	5800	5500

**ОБОРУДОВАНИЕ ОАО «КУЗПОЛИМЕРМАШ»
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПАКЕТОВ**

Автомат для изготовления пакетов АСП-500

Предназначен для изготовления пакетов и обложек для книг и тетрадей из полурукавной полиэтиленовой, полипропиленовой, поливинилхлоридной пленки, укладки их в стопы и отделения заданного количества закладкой. Автоматы могут работать самостоятельно и входить в состав технологических линий.

Тип автомата – полурукавный сварочный.

Тип сварки, используемой в автомате – тепловая резка пленки с оплавлением кромок.

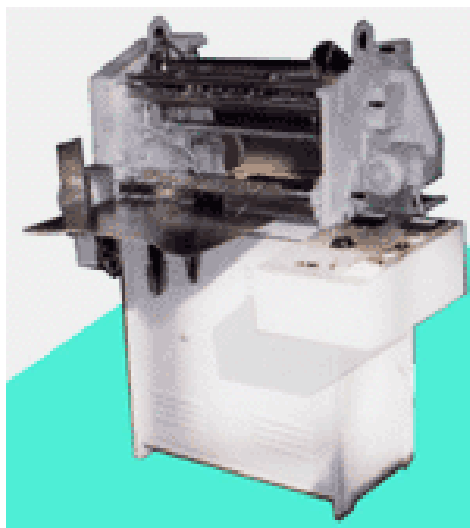


Рис. 14. АСП-500

Технические характеристики	АСП-500
Производительность, шт/ч	2000...2300
Размеры изготавливаемых пакетов, мм:	
длина	250...500
ширина	150...400
Установленная мощность, кВт	0,73
Расход воды, л/ч (не более)	200
Габаритные размеры, мм:	
длина	1400
ширина	1070
высота	1340

Полуавтомат для изготовления пакетов ПАСП-700

Предназначен для тепловой сварки с оплавлением кромок и отрезки пакетов (мешков) в заданный размер из рукавной полиэтиленовой пленки.

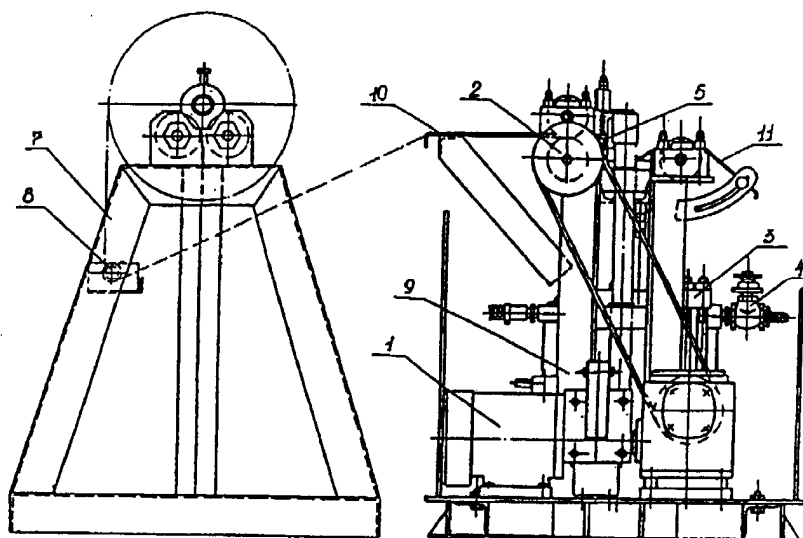


Рис. 15. Полуавтомат для изготовления пакетов ПАСП-700

- | | |
|--------------------------------------|----------------------------|
| 1 – плита в сборе с электроприводом; | 7 – подставка; |
| 2, 8 – валок в сборе; | 8 – оборудование приемное; |
| 3 – пневмоцилиндр; | 9 – рама; |
| 4 – узел подготовки воздуха; | 10, 11 – ограждение |
| 5 – устройство для пайки; | |

Технические характеристики	ПАСП-700
Размер полосы из нихрома, мм	0,3x3x900
Производительность, шт/ч (зависит от размера пакетов и толщины пленки)	300...350
Размеры изготавливаемых пакетов, мм:	
длина	До 1000
ширина	До 700
Толщина пленки, мкм	30...200
Мощность привода подачи рукава, кВт	1,1
Давление воздуха, кгс/см ²	4...6
Расход воздуха, м ³ /ч, не более	1...1,5
Габаритные размеры полуавтомата, мм:	
длина	2100
ширина	740
высота	950

Машина печатная МП-700

Предназначена для ротационной печати на полиэтилене, целлофане, бумаге, фольге.



Рис. 16. Машина печатная МП-700

Технические характеристики	МП-700
Количество печатных секций, шт.	3
Максимальная ширина печати, мм	550
Максимальная ширина материала, мм	700
Развернутая длина клишейного вала, мм	500
Внутренний диаметр втулок бобин, мм	90...100
Скорость печати, м/мин	5...50
Установленная мощность, кВт	2,5
Габаритные размеры, мм:	
длина	2500
ширина	1600
высота	1860

Технические характеристики оборудования для производства листов из термопластов

Марка линии	Марка экструдера	Перераба- тываемый полимер	$G_{\text{л}}$, кг/ч	Размеры листа, мм		Скорость движения листа, м/мин	Установлен- ная мощ- ность, кВт	Габариты, м
				толщина	ширина			
АЛ-1500	ЧП 160x20	ПСУП ПЭНП	До 250	0,6...6	1500	0,1...3	260	18x5,4x3,78
АЛ-1500-2	ЧП 160x20	ПСУП ПЭНП	До 250	1...10	1100...1450	0,1...3	360	17,5x5,5x3,78
АЛ-90-50-1000	ЧП 90x20	ПСУП	До 150	2...16	800...1080	До 18	334	19,1x6,7x2,86
АЛ-125-1500	ЧП 125x20	ПВХ	–	1...12	1500	–	248	23,6x6,0x2,75
АЛ-20-150	ЧП 160x20	ПСУП ПВХ	–	0,4...2	150	–	14,5	3,32x2,7x2,04
АРМ-90-1000	ЧП 90x20	ПСУП	–	0,4...1,4	1000	–	125	7,35x4,0x3,62

$$\sigma = 1 - \frac{6,94}{2(h_2 -$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы материальных расчетов и выбора оборудования для переработки пластических масс литьем под давлением: метод. указ. для практических занятий, курсового и дипломного проектирования. Екатеринбург: УГЛТА, 2001. 44 с.
2. Шембель А. С. Сборник задач и проблемных ситуаций по технологии переработки пластмасс: учеб. пособие для техникумов / А. С. Шембель, О. М. Антипина. Л.: Химия, 1990. 272 с.
3. Основы материальных расчетов и выбора оборудования для переработки пластических масс экструзией: метод, указ. для практических занятий, курсового и дипломного проектирования. Екатеринбург: УГЛТА, 2001. 48 с.
4. Шварц О. Переработка пластмасс / О. Шварц, Ф.-В. Эбелинг, Б. Фурт; под общ. ред. А. Д. Паниматченко. СПб.: Профессия, 2005. 320 с.
5. Крыжановский В. К. Производство изделий из полимерных материалов: учеб. пособие / В. К. Крыжановский, М. Л. Кербер, В. В. Бурлов, А. Д. Паниматченко. СПб.: Профессия, 2004. 464 с.
6. Микаэли В. Экструзионные головки для пластмасс и резины: Конструкция и технические расчеты / В. Микаэли; под ред. В. П. Володина. Пер. с англ. СПб.: Профессия, 2007. 472 с.
7. Раувендаль К. Экструзия полимеров / К. Раувендаль; под ред. А. Я. Малкина. Пер. с англ. СПб.: Профессия, 2006. 768 с.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ.....	3
1.1. ЭКСТРУДЕРЫ.....	3
2. РАСЧЕТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЭКСТРУДЕРОВ.....	8
2.1. РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИИ ШНЕКА И ЧАСТОТЫ ЕГО ВРАЩЕНИЯ.....	8
2.2. РАСЧЕТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОДНОШНЕКОВЫХ ЭКСТРУДЕРОВ.....	10
2.3. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ В ФОРМУЮЩЕЙ ГОЛОВКЕ.....	14
ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ	23
3. ВЫБОР ОСНОВНОГО И ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	29
3.1. ВЫБОР И РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	29
3.2. ВЫБОР И РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	30
4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ.....	31
4.1. РАСЧЕТ РАСХОДА МОЩНОСТИ В ОДНОШНЕКОВОМ ЭКСТРУДЕРЕ	31
4.2. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ЭКСТРУДЕРА.....	33
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	36
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	55